ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 15
2019
№ 3 (171)
март

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д.т.н., проф.
Ю.В. ПАНФИЛОВ

Председатель редакционного совета
д.т.н., проф., заслуженный деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

Заместитель главного редактора
д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:
д.т.н., проф.
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д.т.н., проф.
А.В. КИРИЧЕК
д.т.н., проф.
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:
Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.
В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.
В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.
В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.
С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.
Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.
Н.К. КРИОНИ, д.т.н., проф.
В.П. КУЗНЕЦОВ, д.т.н., проф.
В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.
В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.
Е.Д. МАКАРЕНКО
Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.
Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.
Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.
В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.
А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.
Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.
В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

Редакция:
О.С. ЛУКАШЕНКО
А.В. ОРЛОВА
Е.А. СЕРИКОВА

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" **39269**) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98,
268-47-19.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63956 от 09.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Михно А.Р., Белов Д.Е. Прогнозирование свойств новой порошковой проволоки на основе пыли газоочистки феррохрома 99

Михальченков А.М., Гринь А.М., Гуцан А.А., Уралов С.В.У. Технология повышения ресурса остова составного плужного лемеха путем оптимизации расположения упрочняющего покрытия 103

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Березкин А.Г., Володченко Н.Н., Лобанов А.Ю., Сноз А.Г. Отделочно-упрочняющая обработка цементованных поверхностей шестерен главного редуктора вертолета методами поверхностного пластического деформирования 106

Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь. Оценка напряженного состояния цилиндрических деталей, упрочненных осциллирующим выглаживанием 111

Копылов Ю.Р., Скляренко А.Н., Глазков А.В. Анализ работ по влиянию параметров качества упрочненного поверхностного слоя изделий с ограниченным запасом прочности на его сопротивление усталости 117

Лебедев В.А., Пастухов Ф.А., Соколов В.Д., Бойко М.А. Эффективность применения дополнительной упрочняющей обработки методом поверхностного пластического деформирования для повышения усталостной долговечности деталей 122

Филиппов М.А., Корзунова Е.И., Шарапова В.А., Легчило В.В. Инженерный метод оценки способности металлов и сплавов к деформационному упрочнению 126

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Проскуряков В.И., Мезенцов С.А., Родионов И.В. Структура и твердость поверхности циркония после лазерной модификации 130

Самотугин С.С., Христенко О.А. Анализ технологической системы, процесс резьбонарезания инструментом, прошедшим плазменное модифицирование 134

Хасан И.Х., Фомин Н.Е. Исследование физико-механических свойств алюминиевого сплава после электроискровой обработки 139

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.00 — Машиностроение и машиноведение; 05.05.00 — Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.16.00 — Металлургия и материаловедение, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Упрочняющие технологии и покрытия", 2019

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 15
2019
№ 3 (171)
March

Since 2005, January

Editor-in-Chief
Dr. of Eng. Sci.
Yu.V. PANFILOV

Chair of Editorial Council
Dr. of Eng. Sci., The honoured worker of a science and technics of the RF
V.F. BEZYAZYCHNYI

Editorial Assistant
Dr. of Phys.-Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY

Chairman Assistants:
Dr. of Eng. Sci.
V.Yu. BLUMENSTEIN
Dr. of Eng. Sci.
A.V. KIRICHEK
Dr. of Eng. Sci.
O.V. CHUDINA

Editorial council:
Yu.P. ANKUDIMOV
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.E. GROMOV
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
Yu.R. KOPYLOV
N.K. KRIONI
V.P. KUZNETSOV
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
E.D. MAKARENKO
B.Ya. MOKRITSKY
F.I. PANTELEENKO
H.M. RAKHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUKHOCHEV
V.P. TABAKOV
V.A. SHULOV
M.L. KHEIFETS

Edition:
O.S. LUKASHENKO
A.V. ORLOVA
E.A. SERIKOVA

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue "Pressa Rossii" **39269**) or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by Roskomnadzor. The certificate of registration ПИ № ФС 77-63956. 09.12.2015

CONTENTS

GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E., Mikhno A.R., Belov D.E. Predicting of properties of new flux cored wire based on ferrochrome gas cleaning dust 99

Michal'chenkov A.M., Grin' A.M., Gutsan A.A., Uralov S.V.U. Technology for increasing of resource of frame of composite share by optimizing of location of strengthening coating 103

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Berezkin A.G., Volodchenko N.N., Lobanov A.Yu., Snoz A.G. Finishing-and-strengthening treatment of hardened surfaces of helicopter main gearbox gears by surface plastic deformaition methods 106

Zaydes S.A., Nguyen Van Hinh. Evaluation of stress state of cylindrical parts hardened by oscillating burnishind 111

Kopylov Yu.R., Sklyarenko A.N., Glazkov A.V. Analysis of works on effect of quality parameters of hardened surface layer of products with limited safety margin on its fatigue strength 117

Lebedev V.A., Pastukhov F.A., Sokolov V.D., Boyko M.A. Efficiency of application of additional hardening treatment by surface plastic deformation on increase of fatigue durability of parts 122

Filippov M.A., Korzunova E.I., Sharapova V.A., Legchilo V.V. Engineering method for analysis of ability to strain-hardening of metals and alloys 126

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Proskuryakov V.I., Mezentsov S.A., Rodionov I.V. Structure and hardness of zirconium surface after laser modification 130

Samotugin S.S., Khristenko O.A. Analysis of technological system, threading process by tool after plasma modification 134

Khasan I.Kh., Fomin N.E. Study of physical and mechanical properties of aluminum alloy after electric-spark alloying 139

Reprint is possible only with the reference to the journal "Strengthening technologies and coatings"

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses according to groups of science specialty: 05.02.00 — Mechanical engineering and machinery science; 05.05.00 — Transport, mining and building mechanical engineering; 05.16.00 — Metallurgy and materials science, Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform

© "Innovative mashinostroenie Publishers", "Strengthening Technologies and Coatings", 2019

УДК 621.762.04:[624.567.1:669]

Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Р.Е. Крюков, А.Р. Михно, Д.Е. Белов
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Прогнозирование свойств новой порошковой проволоки на основе пыли газоочистки феррохрома

Изучена возможность изготовления порошковой проволоки с использованием пыли газоочистки производства феррохрома и пыли газоочистки алюминиевого производства при различном соотношении компонентов. При изготовлении порошковой проволоки в качестве восстановителя пыли газоочистки порошка феррохрома использованы порошки кремния КР-1, алюминия ПАП-1, а также в качестве углеродосодержащего материала — пыль газоочистки алюминиевого производства. Наплавка проведена под флюсом, изготовленным из шлака силикомарганца производства Западно-Сибирского металлургического завода. Подобран режим наплавки. Рассчитаны коэффициенты усвоения хрома при различных соотношениях компонентов. Проведена статистическая обработка результатов исследований, построены статистические зависимости влияния компонентного состава на свойства наплавленного слоя.

Ключевые слова: *порошковая проволока, наплавка, образцы, неметаллические включения, микроструктура, твердость, скорость истирания.*

Possibility of manufacture of flux cored wire using gas cleaning dust of ferrochrome production and gas cleaning dust of aluminum production with different components ratio is studied. In the manufacture of flux cored wire as reductant gas-cleaning dust of ferrochrome powder are used powders of silicon KR-1 and aluminum PAP-1, as well as carbonaceous material — gas-cleaning dust of aluminum production. Submerged-arc welding made of silicomanganese slag produced by the West Siberian Metallurgical Plant is performed. Welding mode is selected. Chromium absorption coefficients are calculated at different ratios of components. Statistical processing of the researches results are performed, statistical dependencies of influence of composition on properties of weld deposited laye are constructed.

Keywords: *flux cored wire, welding, samples, non-metallic inclusions, microstructure, hardness, abrasion speed.*

Совершенствованию технологии наплавки для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик технологического оборудования придается большое значение в РФ и за рубежом. Большое внимание разработке новых порошковых проволок и технологий наплавки уделяется в Сибирском государственном индустриальном институте" [1—8]. Ряд технологий защищены патентами РФ [9, 10]. Важную роль в решении проблемы повышения износостойкости покрытий играют порошковые проволоки на основе хрома и его компонентов.

В данной работе рассмотрена возможность изготовления порошковых проволок на основе пыли газоочистки алюминиевого производства, порошков кремния и алюминия (в качестве восстановителя) и пыли газоочистки производства феррохрома (в качестве восстанавливаемого компонента — оксида хрома).

Проволоку изготовляли на лабораторной установке для изготовления порошковых проволок по технологии с пропусканием через фильеры. Диаметр изготовленной проволоки 5 мм, оболочка выполнена из стальной ленты (сталь Ст3).

В качестве восстанавливаемого вещества использовали пыль газоочистки феррохрома, имеющую химический состав, % мас.: 22,5 Cr_2O_3; 15,5 SiO_2; 0,4 CaO; 31,1 MgO; 5,4 Al_2O_3; 6,0 FeO_2; 6,2 C; 1,2 S. В качестве восстановителя использовали порошки: кремния КР-1 по ГОСТ 2169—69,

Таблица 1

Компонентный состав порошковых проволок

Номер образца	Восстановитель	Масса пыли газоочистки ферро-хрома, г	Концентрация пыли газоочистки ферро-хрома, %	Масса восстановителя, г	Концентрация восстановителя, %
1	Пыль газоочистки производства алюминия (углерод)	100	79,18	26,3	20,82
2			71,73	39,4	28,27
3			65,53	52,6	34,47
4			55,9	78,9	44,1
5	Порошок кремния КР-1	100	88,88	12,5	11,12
6			84,25	18,7	15,75
7			80	25	20
8			72,73	37,5	27,27
9	Порошок алюминия ПАП-1	100	92,42	8,2	7,78
10			89,13	12,2	10,87
11			85,91	16,4	14,09
12			72,73	37,5	27,27

Таблица 2

Параметры порошковых проволок

Номер образца	Масса, г			Коэффициент заполнения, %	Усвоение хрома, %
	общая	оболочки	порошка		
1	31,8	25,6	6,2	24	85,2
2	31,6	24,5	7,1	29	99,3
3	27,7	22,6	5,1	23	93,9
4	26,5	24,3	2,2	9	38,9
5	28,8	24,5	4,3	10	91,0
6	28,7	25,5	3,2	28	51,3
7	23,5	20,5	3	14	71,3
8	29	25,5	3,5	27	65,0
9	25,7	23,5	2,2	17	28,3
10	31,5	24,7	6,8	13	98,3
11	26,5	23,4	3,1	15	40,1
12	31,2	24,6	6,6	14	98,3

мас. %: 98 Si; 0,7 Fe; 0,7 Al, 0,6 Ca; алюминия ПАП-1 по ГОСТ 5494—96, % мас.: 0,5 Fe; 0,4 Si; 0,05 Cu; 0,01 Mn; а также в качестве углеродосодержащего материала — пыль газоочистки алюминиевого производства, % мас.: 21...46,23 Al_2O_3; 18...27 F; 8...15 Na_2O; 0,4...6 K_2O; 0,7...2,3 CaO; 0,5...2,48 SiO_2; 2,1...3,27 Fe_2O_3; 12,5...30,2 $C_{общ}$; 0,07...0,9 MnO; 0,06...0,9 MgO; 0,09...0,19 S; 0,1...0,18 P.

В табл. 1 приведены компонентные составы, в табл. 2 — полученные параметры исследуемых проволок. Наплавку проводили под флюсом, изготовленным из шлака силикомарганца производства Западно-Сибирского металлургического завода с химическим составом, % мас.: 6,91...9,62 Al_2O_3; 22,85...31,70 CaO; 46,46...48,16 SiO_2; 0,27...0,81 FeO; 6,48...7,92 MgO; 8,01...8,43 MnO; 0,28...0,76 F; 0,26...0,36 Na_2O; 0,62 K_2O; 0,15...0,17 S; 0,01 P, с использованием сварочного трактора ASAW-1250 на стальные пластины толщиной 10 мм размерами 100×500 мм. Оптимальные режимы наплавки (удовлетворительное качество наплавляемого валика): для проволок с добавлением пыли газоочистки производства алюминия (углерода) — сила тока 620 А, напряжение 32 В, скорость сварки 28 м/ч; для проволок с использованием кремния — сила тока 620 А, напряжение 32 В, скорость наплавки 25 м/ч; для проволок с алюминием — сила тока 550 А, напряжение 28 В, скорость наплавки 12 м/ч.

Химический состав наплавленного металла и полученных шлаковых корок определяли рентгенофлюоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71 (табл. 3, 4). Твердость наплавленных слоев измеряли с помощью твердомера МЕТ-ДУ, износ образцов — на машине 2070 СМТ-1.

При испытании на износостойкость использовали метод потери массы образца, который основывается на изменении массы образца при испытаниях по схеме диск—колодка. Испытания выполняли при режиме: нагрузка 30 мА (78,4 Н), частота вращения 20 мин$^{-1}$, нагружение образцов проводили с помощью пружинного механизма, частоту вращения измеряли с помощью тахогенератора на валу двигателя, а число оборотов — с помощью бесконтактного датчика. В процессе испытания образец взаимодействовал с колодкой, изготовленной из стали Р18. Твердость и результаты испытания на износостойкость приведены в табл. 5.

Проведенные исследования показали, что при прочих равных условиях усвоение хрома зависит от коэффициента заполнения порошковой проволоки (см. рисунок).

Таблица 3

Химический состав наплавленного слоя металла

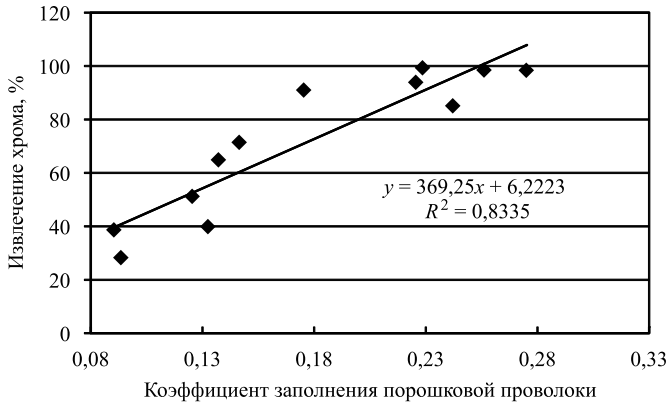
Номер образца	Содержание элементов, % мас.													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	Co	Nb	Ti
1	0,12	0,43	1,10	0,012	0,05	0,43	0,064	0,057	0,006	0,006	0,006	0,015	0,009	0,005
2	0,17	0,57	1,35	0,012	0,09	0,48	0,07	0,05	0,01	0,004	0,004	0,02	0,003	0,004
3	0,20	0,50	1,00	0,014	0,09	0,42	0,07	0,05	0,01	0,004	0,010	0,02	0,004	0,004
4	0,26	0,60	1,17	0,016	0,10	0,37	0,07	0,06	0,01	0,010	0,010	0,02	0,003	0,004
5	0,12	0,90	1,28	0,018	0,11	0,71	0,07	0,10	0,01	0,010	0,002	0,02	0,002	0,004
6	0,10	1,04	1,31	0,020	0,09	0,53	0,07	0,07	0,01	0,020	0,006	0,02	0	0,004
7	0,10	1,15	1,25	0,017	0,10	0,60	0,06	0,06	0,01	0,010	0,010	0,02	0,001	0,005
8	0,09	1,34	1,11	0,019	0,08	0,53	0,07	0,07	0,01	0,020	0,010	0,02	0,002	0,004
9	0,08	0,76	1,79	0,014	0,08	0,43	0,08	0,05	0,01	0,004	0,010	0,02	0,002	0,004
10	0,12	0,67	1,42	0,014	0,10	0,49	0,07	0,05	0,01	0,004	0,020	0,02	0	0,004
11	0,10	0,61	1,14	0,013	0,08	0,40	0,07	0,05	0,01	0,004	0,030	0,02	0,01	0,004
12	0,12	0,83	1,66	0,018	0,07	0,43	0,07	0,07	0,01	0,02	0,070	0,02	0,001	0,004

Таблица 4

Химический состав шлаковых корок

Номер образца	Содержание элементов, % мас.											
	FeO	MnO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	S	P	F	Cr_2O_3
1	2,05	6,99	28,71	44,02	6,97	9,01	0,39	Отс.	0,16	0,010	0,54	0,72
2	2,41	6,79	27,05	45,61	9,07	5,34	0,65	0,41	0,27	0,011	0,63	0,74
3	2,28	6,67	26,7	44,29	9,16	5,01	0,66	0,37	0,27	0,011	0,82	0,67
4	2,12	6,74	27,17	45,90	9,74	4,39	0,67	0,39	0,28	0,011	0,82	0,49
5	1,83	6,82	27,31	46,21	9,42	5,19	0,58	0,41	0,27	0,011	0,43	0,77
6	1,58	6,58	26,96	44,73	9,83	5,80	0,57	0,39	0,27	0,011	0,39	0,80
7	1,52	6,58	26,75	44,31	9,99	5,15	0,55	0,38	0,26	0,011	0,40	0,72
8	1,25	6,63	25,97	45,10	10,52	4,89	0,55	0,39	0,28	0,011	0,42	0,56
9	1,94	6,71	25,69	45,68	8,47	6,07	0,62	0,40	0,28	0,011	0,44	1,06
10	2,12	6,59	25,45	45,69	8,28	6,00	0,60	0,40	0,27	0,011	0,39	1,16
11	1,93	6,65	26,14	46,27	8,51	5,48	0,60	0,43	0,28	0,011	0,50	0,99
12	1,91	6,45	26,46	47,37	8,65	6,21	0,63	0,43	0,29	0,012	0,48	1,07

Оценку влияния химического состава порошковой проволоки с использованием пыли газоочистки производства феррохрома и пыли газоочистки алюминиевого производства на степень износа и твердость наплавленного слоя проводили средствами многофакторного корреляционного анализа, который позволяет изучить закономерности изменения результирующего показателя в зависимости от поведения различных факторов по известным методикам.



Зависимость усвоения хрома от коэффициента заполнения порошковой проволоки

Для проведения анализа были определены факторы, которые оказывают воздействие на изучаемый показатель, и отобраны наиболее существенные из них (см. табл. 3 и 5). После этого выполнена проверка исходной информации на достоверность, однородность, соответствие закону нормального распределения.

Расчет основных показателей связи корреляционного анализа проводили поэтапно. Сначала в расчет принимали один фактор, который оказывает наиболее значимое влияние на результирующий показатель, затем — второй, третий и т.д. На каждом этапе рассчитывали уравнение связи и показатели, с помощью которых оценивали его надежность.

Таблица 5

Результаты испытаний образцов на износ

Номер образца	НВ	Масса, г		Потеря массы, г	Число оборотов	Износ, г/об
		до испытаний	после испытаний			
1	175,11	78,80	78,48	0,32	3574	0,000090
2	158,89	92,00	91,58	0,42	3300	0,000127
3	169,11	106,08	105,60	0,48	3240	0,000148
4	167,11	53,54	53,18	0,36	3580	0,000101
5	171,67	73,27	72,88	0,39	3730	0,000105
6	140,67	39,23	38,92	0,31	3530	0,000088
7	164,78	81,98	81,70	0,28	3814	0,000073
8	152,36	56,25	55,75	0,50	3370	0,000148
9	133,22	98,25	97,77	0,48	3805	0,000126
10	147,78	102,05	101,65	0,40	3800	0,000105
11	132,11	86,33	85,81	0,52	3530	0,000147
12	164,89	56,10	55,48	0,62	3800	0,000163

По результатам вычислений получены зависимости, адекватность которых фактическим значениям проверяли по показателю средней ошибки аппроксимации:

$$\overline{\varepsilon} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left|\frac{Y_i - \tilde{Y}_i}{Y_i}\right| \cdot 100,$$

где m — число наблюдений; $\tilde{Y}_i$, Y_i — вычисленное и фактическое значение результирующего показателя соответственно.

Зависимости твердости наплавленного слоя и его износостойкости от массовой доли элементов, входящих в состав порошковых проволок, полученные в результате проведенного анализа:

$$\text{НВ} = 368{,}504 + 283{,}917\text{C} + 58{,}821\text{Si} - 27{,}909\text{Mn} - 1407{,}34\text{S} - 95{,}985\text{Cr} - 1899{,}96\text{Ni} + 1566{,}943\text{Cu} - 4454{,}3\text{V} + 222{,}375\text{Al} - 5200{,}13\text{Nb}$$

(ошибка аппроксимации 0,64 %).

Скорость изнашивания

$$v_{изн} = -0{,}000509 + 0{,}000648\text{C} + 0{,}000101\text{Si} - 0{,}000099\text{Mn} + 0{,}000099\text{P} - 0{,}001911\text{S} + 0{,}000496\text{Cr} + 0{,}008647\text{Ni} - 0{,}0017087\text{Cu} - 0{,}002118\text{V} + 0{,}0021128\text{Al} + 0{,}0022335\text{Nb}$$

(ошибка аппроксимации 0,21 %).

Полученные зависимости могут быть использованы для прогнозирования твердости наплавленного слоя и его износостойкости при изменении химического состава наплавленного металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Козырев Н.А., Кибко Н.В., Уманский А.А. и др.** Исследование и разработка новых составов порошковой проволоки системы C—Si—Mn—Cr—V—Mo для наплавки прокатных валков // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 10. С. 727—733.

2. **Козырев Н.А., Кибко Н.В., Уманский А.А. и др.** Совершенствование состава порошковых проволок системы C—Si—Mn—Cr—W—V с целью повышения качества и эксплуатационных характеристик наплавленного слоя // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 11. С. 806—813.

3. **Composition** of C—Si—Mn—Cr—W—V Powder Wire and Quality of Surfacing / N.A. Kozyrev, N.V. Kibko, A.A. Umanskii et al. // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 11. P. 781—787.

4. **Гусев А.И., Козырев Н.А., Кибко Н.В. и др.** Изучение структуры и свойств металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe—C—Si—Mn—Cr—Mo—Ni—V—Co // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4. № 2. С. 113—119.

5. **Гусев А.И., Кибко Н.В., Попова М.В. и др.** Наплавка порошковыми проволоками C—Si—Mn—Mo—V—B и C—Si—Mn—Cr—Mo—V деталей горнорудного оборудования // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 4. С. 318—323.

6. **Козырев Н.А., Кибко Н.В., Уманский А.А. и др.** Повышение качества наплавленного слоя прокатных валков за счет оптимизации состава порошковых проволок // Сварочное производство. 2017. № 7. С. 29—34.

7. **Разработка** новых порошковых проволок для наплавки деталей, работающих в условиях ударно-абразивного износа / Н.А. Козырев, А.И. Гусев, Р.Е. Крюков и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. Вып. 7 (1423). С. 70—77.

8. **Разработка** новых порошковых проволок для наплавки. Порошковая проволока на основе пыли газоочистки силикомарганца / Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Непомнящих А.С. и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. Вып. 9 (1425). С. 101—106.

9. **Пат. 2623981 РФ, МПК^8 B23 K35/36 B 23K35/368.** Шихта порошковой проволоки / Н.А. Козырев, Г.В. Галевский, В.М. Шурупов и др.; ФГБОУ ВО "Сибирский государственный индустриальный университет". № 2015152933/02(081567); заявл. 09.12.2015; опубл. 29.06.2017, Бюл. № 19.

10. **Пат. 2661126 РФ, МПК^8 B23 K35/36 B 23 K35/368**. Шихта порошковой проволоки / Н.А. Козырев, А.А. Уманский, Р.Е. Крюков и др.; ФГБОУ ВО "Сибирский государственный индустриальный университет". № 2017121945/02(038002); заявл. 21.06.2017.

УДК 631.372

А.М. Михальченков, А.М. Гринь, А.А. Гуцан, С.В.У. Уралов
(Брянский государственный аграрный университет)
E-mail: mihalchenkov.alexandr@yandex.ru

Технология повышения ресурса остова составного плужного лемеха путем оптимизации расположения упрочняющего покрытия

Предложена технология упрочнения остова составного лемеха, обеспечивающая увеличение ресурса в 1,5...1,7 раза по сравнению с серийным и заключающаяся в наплавке валиков с тыльной и наружной стороны поочередно в шахматном порядке, металл которых имеет твердость около 62 HRC и в структуре присутствуют включения повышенной твердости (80...84 HRA).

Ключевые слова: *составной лемех, ресурс, износостойкость, твердость, наплавка, упрочнение, скорость изнашивания, агротехнические условия.*

The hardening technology of the frame of the composite share is proposed, providing increase in resource by 1.5...1.7 times compared to the serial one and consisting in bead surfacing from the back and outer side alternately in staggered order, the metal, which has hardness of about 62 HRC and in the structure contains of increased hardness inclusions (80...84 HRA).

Keywords: *composite share, resource, wear resistance, hardness, welding, hardening, wear rate, agrotechnical conditions.*

Введение

Сравнительно невысокий ресурс и значительная рыночная стоимость деталей рабочих органов широкозахватных почвообрабатывающих орудий привели к необходимости проведения технологических мероприятий по их упрочнению [1, 2].

Применение составных лемехов импортного производства (или изготовленных по лицензионным технологиям) позволило существенно повысить эффективность эксплуатации пахотных агрегатов путем увеличения ресурса и стойкости к абразивному изнашиванию. Это достигается за счет периодической замены утративших рабо-

тоспособное состояние долот на новые и термоупрочнения составляющих элементов лемеха на твердость 48...53 HRC [3]. В свою очередь, использование методов упрочняющей термической обработки металла остова хотя и приводит к росту ресурса детали в целом [4], однако при нынешнем состоянии сельскохозяйственного производства считать достаточным его нельзя.

Ограничение лемеха по наработке определяется предельным состоянием остова, износом его по ширине (долото заменяемо). До полной утраты лемехом работоспособности используется три комплекта долот [5]. Как правило, величина допустимого износа остова по ширине составляет 60 мм для деталей всех зарубежных компаний, присутствующих на рынке сельскохозяйственной техники России. Такая ширина позволяет проводить упрочнение путем нанесения абразивостойких защитных покрытий. Технологические мероприятия подобного плана применяются достаточно широко, но им присущ ряд недостатков, не позволяющих существенно повысить ресурс лемеха [6, 7].

Например, после восстановления нормированных размеров остова выполняется упрочняющая наплавка тыльной стороны лезвийной области по всей длине и на всю ширину лезвия сплавом, обеспечивающим твердость 58...62 HRC [8]. Технология обеспечивает определенное увеличение износостойкости лезвия, однако наплавленный слой не охватывает всю площадь, определяющую его работоспособное состояние. Немаловажный фактор использования данной технологии — нарушение геометрической формы лезвия, установленной агротехническими и эксплуатационными требованиями на вспашку, и как следствие — увеличение тягового сопротивления пахотного агрегата.

В связи с этим **цель данной работы** — разработка технологии упрочнения остова составных плужных лемехов, которая обеспечивает существенное повышение ресурса при минимальном нарушении геометрической формы с соблюдением эксплуатационных и агротехнических условий на вспашку.

Материалы и режимы наплавки

Для исследований применяли лемеха компании "Кун". В экспериментах использовали восемь упрочненных лемехов и восемь лемехов заводского исполнения без дополнительного упрочнения. Исходная твердость опытных деталей составляла 48...50 HRC.

В качестве электродного материала при наплавке использовали самозащитную порошковую проволоку компании Castolin Eutactic марки TeroMates AN 4660 на основе высокохромистого чугуна с присутствием ниобия, обеспечивающую твердость сформированного металла около 59 HRC и наличие в структуре карбидов твердостью 80...84 HRA. Формирование твердого покрытия проведено полуавтоматическим способом дуговой электросваркой. Диаметр проволоки $d_э$ = 2,8 мм; сила сварочного тока $I_{св}$ = 250 А.

Тестирование опытных изделий проводили в полевых условиях при вспашке супесчаных и легкосуглинистых почв шестнадцатикорпусным оборотным плугом. Предельное состояние испытуемых лемехов определяли износом остова по ширине, равным 60 мм.

Результаты исследования и их обсуждение

Задачи, которые были поставлены при проведении эксперимента:

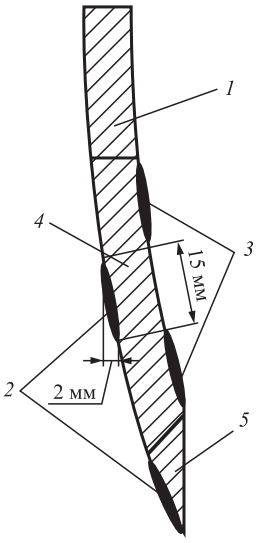
1) область, определяющая предельное состояние, должна быть упрочнена на всю ширину и по всей длине;

2) упрочнение необходимо провести таким образом, чтобы свести к минимуму уровень остаточных напряжений;

3) наряду с высокой твердостью наплавленного металла следует обеспечить присутствие в его структуре достаточного количества карбидов.

Для этого на тыльной и наружной сторонах поочередно, начиная с лезвийной области, по всей длине и ширине истираемой в процессе эксплуатации части остова наплавляли валики (см. рисунок).

Далее по тексту технология изложена применительно к остову составного лемеха компании "Кун".



Остов составного лемеха с упрочняющей наплавкой: *1* — остов лемеха; *2* — наплавленные валики на тыльной и наружной сторонах; *4* — область, лимитирующая работоспособное состояние лемеха (ограничена горизонтальной утолщенной линией); *5* — лезвие

Первый валик шириной 15 мм и высотой не более 2 мм наносили на тыльную сторону лезвия. Следующий валик с такими же геометрическими размерами наносили на рабочую поверхность так, чтобы имелось общее "сечение соприкосновения" с предыдущим валиком после его охлаждения до 40...60 °С. Расстояние между валиками (шаг) на каждой отдельной поверхности составляло 15 мм. Затем процесс повторялся.

Твердость материала нанесенных слоев получена в пределах 58...62 HRC при наличии в структуре наплавленного металла включений карбидов твердостью 80...84 HRA. Расположение слоев последовательно друг за другом на наружной и тыльной сторонах остова также позволило существенно снизить интенсивность изнашивания лемехов.

Каждый предыдущий слой охлаждали до 40...60 °С перед формированием следующего, что способствовало снижению остаточных напряжений. Расположение валиков с двух сторон остова в шахматном порядке по ширине, имеющих общее "сечение соприкосновения", в определенной мере, обеспечивает взаимную компенсацию создаваемых напряжений второго рода. Таким образом, снижается вероятность изменения формы остова.

Незначительная высота сформированных слоев (не более 2 мм) не окажет заметного влияния на расход топлива агрегата вследствие минимального изменения рельефа рабочей поверхности по ширине.

Как показали полевые сравнительные испытания опытных лемехов, применение рассмотренных технологических мероприятий позволило обеспечить повышение ресурса в 1,5...1,7 раза в сравнении с деталями заводского исполнения при одинаковом расходе топлива и качестве обработки почвы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ерохин М.Н., Новиков В.С., Петровский Д.И.** К вопросу об импортозамещении рабочих органов зарубежных почвообрабатывающих машин // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 121. С. 206—212.
2. **Титов Н.В., Коломейченко А.В., Виноградов В.В.** Анализ перспективных способов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин // Техника и оборудование для села. 2013. № 10. С. 33—36.
3. **Ляляки н В.П.** О восстановлении деталей машин и механизмов // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. № 5. С. 9—10.
4. **Михальченков А.М., Соловьев С.А., Новиков А.А.** Об одной причине низкого ресурса деталей рабочих органов отечественных почвообрабатывающих орудий // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 7. С. 127—132.
5. **Лискин И.В., Миронов Д.А., Панов А.И., Горбачев И.В.** Лемеха с накладным долтом для плугов об общего назначения // Сельский механизатор. 2016. № 11. С. 14—15.
6. **Лебедев А.Т., Магомедов Р.А.** Износостойкость рабочих органов // Сельский механизатор. 2011. № 10. С. 34—36.
7. **Козарез И.В., Новиков А.А., Михальченкова М.А.** Повышение твердости компенсирующих элементов // Сельский механизатор. 2017. № 3. С. 34—35.
8. **Тюрева А.А., Козарез И.В., Дьяченко А.В.** Твердость лемехов компании VOGEL & NOOT // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 3 (55). С. 60—65.

УДК 621.787

А.Г. Березкин, Н.Н. Володченко, А.Ю. Лобанов, А.Г. Сноз
(АО "Московский вертолетный завод им. М.Л. Миля")
E-mail: aberezkin@mi-helicopter.ru

Отделочно-упрочняющая обработка цементованных поверхностей шестерен главного редуктора вертолета методами поверхностного пластического деформирования

Описана технология отделочно-упрочняющей обработки методами поверхностного пластического деформирования цементованных периферийных слоев деталей "шестерня" главного редуктора вертолета. Приведены результаты исследований поверхности. Выбранные методы обработки позволяют получить благоприятную структуру поверхностного упрочненного слоя.

Ключевые слова: *отделочно-упрочняющая обработка, поверхностное пластическое деформирование, цементованные поверхности, виброшлифование, сжимающие остаточные напряжения.*

The technology of finishing-and-strengthening treatment by surface plastic deformation methods of hardened peripheral layers of gear parts of helicopter main gearbox is described. Surface researches results are presented. Selected processing methods allow to obtain favorable structure of strengthened surface layer.

Keywords: *finishing-and-strengthening treatment, surface plastic deformation, hardened surfaces, vibrogrinding, compressive residual stress.*

Одна из составляющих повышения конкурентоспособности отечественных вертолетов на мировом рынке — повышение надежности и увеличение ресурса как отдельных агрегатов, так и всего летательного аппарата в целом. Проблемой дальнейшего увеличения ресурса главного редуктора вертолета с четырьмя степенями редукции является выкрашивание поверхностного слоя на рабочих поверхностях зубьев шестерен четвертой ступени. На определенном этапе происходит разрушение поверхностного цементованного слоя зуба шестерни, изготовленной из стали 12Х2Н4А-Ш, глубина цементации 1,2...1,5 мм. Технологический способ, позволяющий решить данную проблему, — поверхностное пластическое деформирование (ППД).

В настоящее время боковые поверхности зуба шестерни после цементации шлифуют абразивным кругом. Однако это ухудшает эксплуатационные свойства шестерни из-за возможных прижогов и возникновения растягивающих напряжений.

Максимум остаточных сжимающих напряжений в цементованных или цианированных деталях располагается не у самой поверхности, а на некоторой глубине. У самой поверхности наблюдается уменьшение остаточных сжимающих напряжений, а в ряде случаев — переход их в растягивающие напряжения [1]. В связи с этим применение обработки методами ППД приводит к повышению сжимающих напряжений в наиболее ответственных периферийных слоях.

Несмотря на частое упоминание в литературе об упрочнении методами ППД поверхностных слоев деталей типа шестерня, в том числе цементованных [2—6], существует мало источников с примерами практического применения в промышленности и описанием средств оснащения для выполнения данной операции.

Цель работы — разработка технологического процесса обработки цементованных поверхностей зубьев шестерен с модулем m = 4,5 третьей и четвертой ступеней редукции главного редуктора вертолета методами ППД.

Порядок проведения опытных работ

В ходе выполнения работы в АО "МВЗ им. М.Л. Миля" проводили отделочно-упрочняющую обработку методами ППД деталей "шестерня" третьей и четвертой ступеней редукции главного редуктора вертолета. Равномерность обработки поверхности элементов зуба шестерни (отсутствие необработанных мест, следы предыдущей механической обработки и т.п.) исследовали визуально. Оценку качества поверхности проводили визуально с помощью 10-кратной лупы. Также для количественного подтверждения эксперимента были отобраны четыре шестерни для анализа остаточных напряжений после каждого цикла обработки. Замеры выполняли на установке ДРОН-3М. Поверхности этих шестерен были сфотографированы после каждого цикла обработки на микроскопе Carl Zeiss Stemi 508. Также были проведены замеры размеров деталей до и после обработки в целях выявления возможных отклонений после упрочнения и корректирования технологического процесса изготовления деталей.

На основе современных представлений об обработке поверхностей и имеющегося на опытном производстве АО "МВЗ им. М.Л. Миля" технологического оборудования было принято решение проводить обработку шестерен комбинированным методом:

1) упрочнение на роторной установке дробеметным методом металлическими шариками;

2) виброшлифовка абразивными гранулами на низкочастотном вибростанке.

Достоинством данного метода, помимо упрочнения поверхностного слоя шестерни, является получение лучшей шероховатости поверхности без изменения геометрии самой детали, что способствует уменьшению возможности появления дефектов зубьев шестерен. Также данный метод обеспечивает равномерное распределение на поверхности детали остаточных напряжений сжатия.

Упрочнение металлическими шариками в роторной установке осуществляется дробеметным способом. В результате на поверхности детали создается регулярный микрорельеф и в поверхностном слое наводятся сжимающие остаточные напряжения.

Режимы упрочнения на роторной установке дробеметным методом: рабочая среда — стальные шарики диаметром 2 мм; время упрочнения для шестерен 20...30 мин (в зависимости от номенклатуры деталей); частота вращения ротора — 3000 мин$^{-1}$.

Виброшлифование детали в абразивной среде представляет собой процесс сглаживания микронеровностей и съема мельчайших частиц материала с обрабатываемой поверхности частицами рабочей среды, совершающими в процессе работы колебательное движение, обусловленное воздействием вибраций, сообщаемых контейнеру, в котором размещены обрабатываемые детали и рабочая среда.

Режимы виброшлифовки на вибростанке: рабочая среда — корунд; частота 5...6 Гц, амплитуда 50 мм; время обработки для каждой шестерни 60 мин; непрерывный способ промывки.

Основные факторы, влияющие на процесс упрочнения шестерен дробеметным методом в роторной установке. В ходе данной работы была апробирована разработанная и изготовленная в АО "МВЗ им. М.Л. Миля" установка для роторного упрочнения деталей (рис. 1).

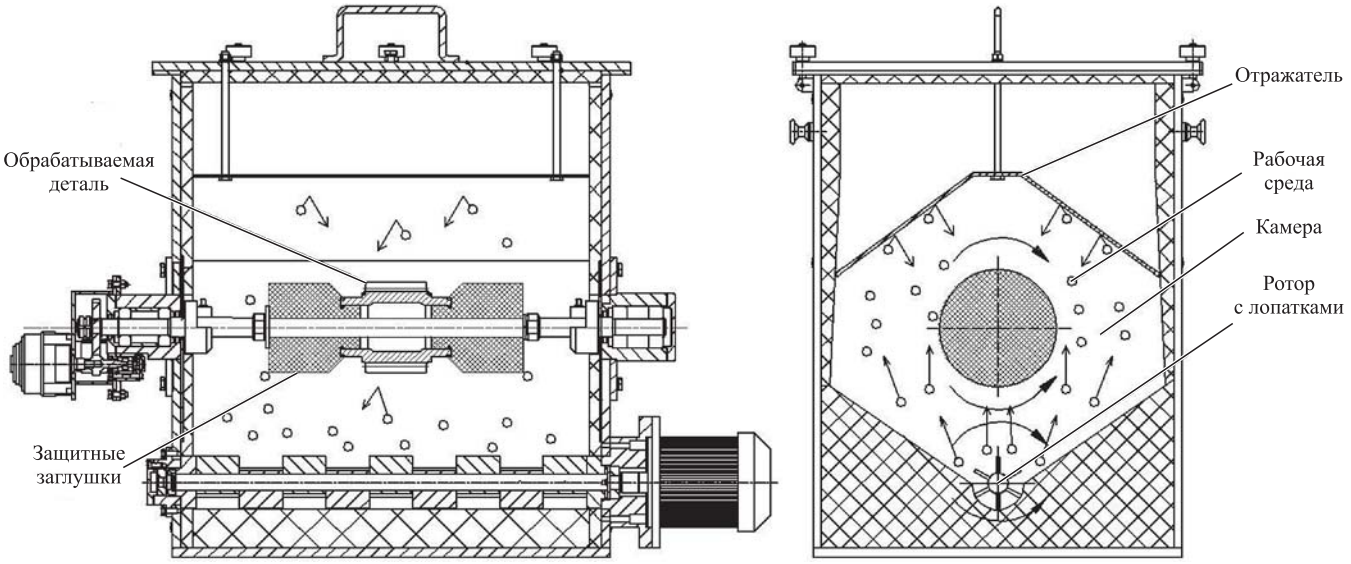


Рис. 1. Схема роторной установки для обработки шестерен

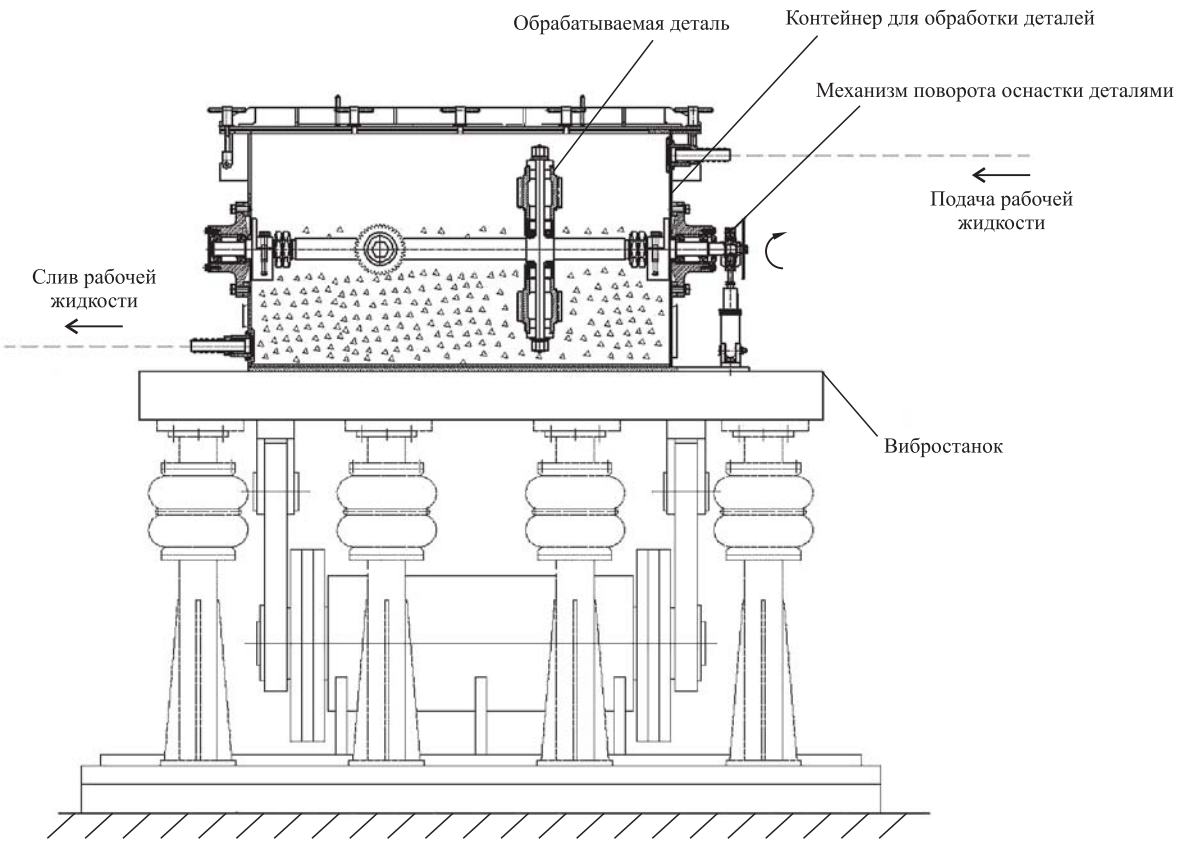


Рис. 2. Схема установки для виброабразивной обработки шестерен

Процесс упрочнения элементов зуба шестерни в роторной установке происходит следующим образом. В камеру роторной установки засыпают рабочую среду, устанавливают обрабатываемую деталь (или несколько), сообщают ей вращательное движение, приводят рабочую среду в движение при помощи вращения ротора с лопатками в нижней части контейнера и таким образом осуществляется заданное воздействие на деталь потоком рабочей среды. Рабочий объем камеры регулируется с помощью передвижного по высоте отражателя рабочей среды.

Основные факторы, влияющие на процесс виброшлифования шестерен на вибростанке. В ходе данной работы было апробировано разработанное и изготовленное в АО "МВЗ им. М.Л. Миля" устройство для виброшлифовки деталей (рис. 2). Устройство состоит из контейнера, изготовленного из коррозионно-стойкой стали, устройства поворота детали, ванны для отстоя и подачи рабочей жидкости. Процесс виброшлифования элементов зуба происходит следующим образом: обрабатываемые шестерни закрепляют на коромысле с двух сторон, коромысло устанавливается перпендикулярно к валу контейнера. Число коромысел ограничивается размером контейнера и нагрузкой на вал. Апробирована установка как с одним, так и двумя коромыслами и максимальное число одновременно обрабатываемых деталей доведено до четырех.

Контейнер, в свою очередь, жестко крепится к столу вибростанка. Колебательные движения контейнеру сообщаются вибростанком при помощи вибратора. В процессе колебаний контейнера рабочая среда непрерывно подвергается знакопеременным ускорениям. Особенностью вибростанка является то, что вибростол закреплен консольно и движение рабочей среды имеет две составляющие — горизонтальную и вертикальную. Такое движение рабочей среды создает добавочную силу, которая прижимает частицы абразива к поверхности детали, что позволяет более эффективно проводить обработку. Для равномерного съема металла с деталей вал с шестернями приводится во вращение с помощью специального механизма.

Результаты упрочнения и виброшлифования шестерен

Остаточные напряжения. Из результатов исследования видно, что после шлифовки детали имеют большой разброс напряжений сжатия, на

одной шестерне были выявлены напряжения растяжения (одна точка). Возможно, это является следствием прижогов при шлифовке обрабатываемых поверхностей.

Упрочнение на роторной установке стабилизирует напряжения на поверхности деталей, а последующая виброшлифовка увеличивает их значение. На рис. 3 показаны гистограммы средних значений замеров остаточных напряжений у исследуемых деталей.

Нетрудно видеть, что упрочнение деталей по предложенному методу приводит к увеличению остаточных напряжений сжатия.

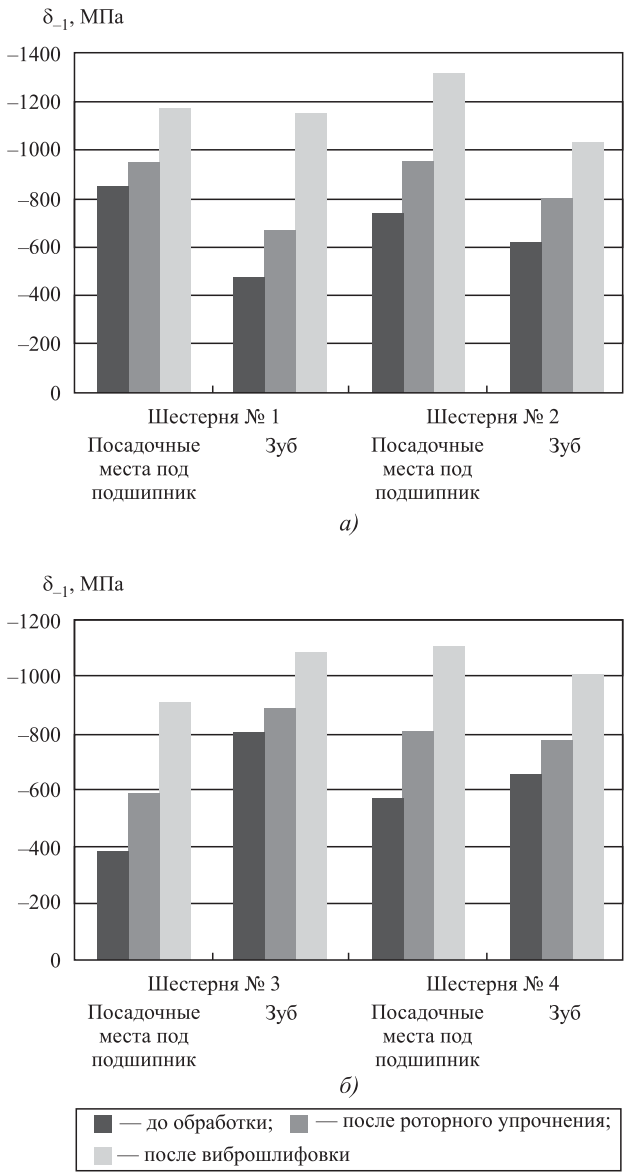


Рис. 3. Гистограмма средних значений остаточных напряжений в шестернях третьей (*а*) и четвертой (*б*) ступеней редукции

Внешний вид поверхности шестерни № 1 после каждого вида обработки. После каждого этапа обработки деталей, на которых проведен анализ остаточных напряжений, были сделаны фотографии поверхностей на микроскопе Carl Zeiss Stemi 508.

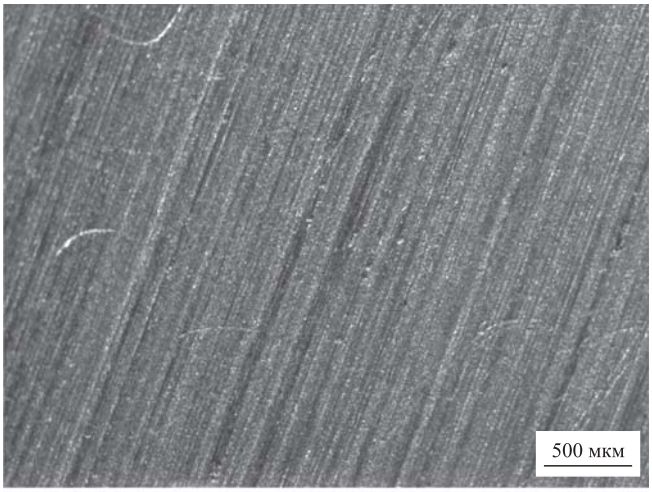
Внешний вид зуба шестерни до обработки имеет продольные следы от инструмента на боковой поверхности зуба (рис. 4, *а*).

Внешний вид зуба шестерни после упрочнения шарами диаметром 2 мм имеет характерный микрорельеф поверхности со следами от ударов шариками (рис. 4, *б*).

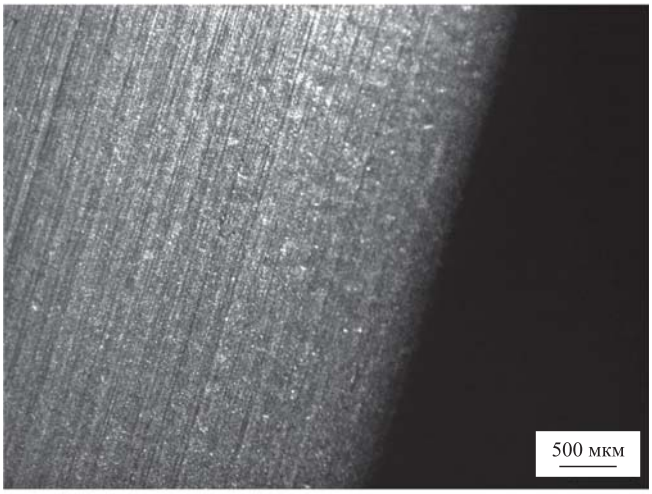
Внешний вид зуба шестерни после упрочнения шарами диаметром 2 мм и виброшлифовки трианглом 6×6 мм имеет равномерную матовую поверхность, микрорельеф от упрочнения отсутствует. Риски от предыдущей механообработки отсутствуют (рис. 4, *в*).

Замеры поверхностей до и после обработки. Известно, что упрочнение методами ППД приводит к изменению размеров детали и это следует учитывать при разработке технологического процесса механической обработки, предусматривая необходимые допуски. Также в литературе встречается мало информации об изменении размеров цементованных деталей после их обработки методами ППД. Было принято решение о замерах посадочных размеров под подшипники деталей "шестерня" на одной из партий. Замеры проводили до обработки методами ППД, а также после каждого цикла обработки, т.е. упрочнения на роторной установке и виброшлифовки. Размеры цементованных поверхностей шестерен не изменились, изменения были выявлены в пределах погрешности измерений. Влияние поверхностного пластического деформирования на изменение размеров цементованных поверхностей практически отсутствует, поэтому при изготовлении деталей нет необходимости изменять технологический процесс и предусматривать возможное изменение геометрии детали.

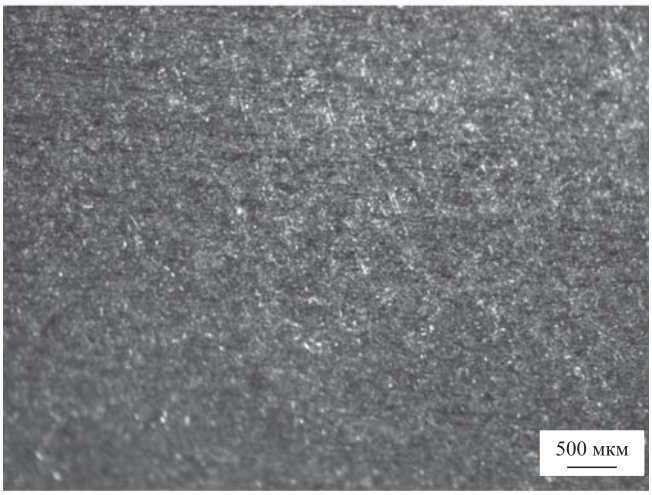
Результаты ресурсных испытаний главных редукторов. Шестерни, прошедшие обработку методами ППД, были установлены на главный редуктор для проведения ресурсных стендовых испытаний. Испытания проводили на режимах, соответствующих эксплуатационным, с учетом коэффициента перегрузки, равного 1,4. После наработки 310 ч редуктор был разобран для оценки состояния шестерен. По результатам осмотра — шестерни в хорошем состоянии, практически без следов износа (рис. 5, *а*). При аналогичной наработке шестерен редукторов без применения тех-



а)

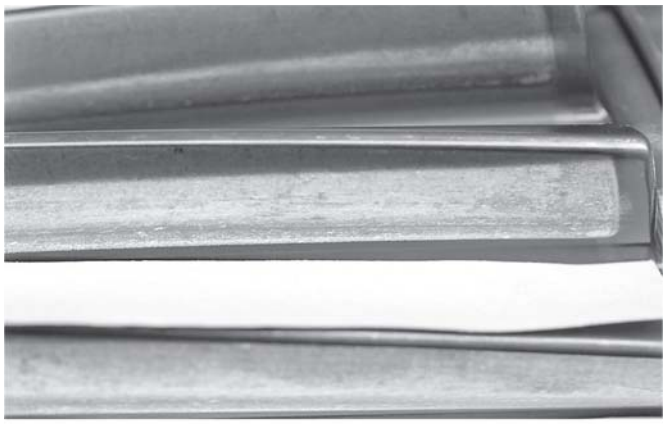


б)



в)

Рис. 4. Поверхность зуба шестерни № 1 третьей ступени редукции:
а — исходная; *б* — после упрочнения в роторной установке; *в* — после упрочнения шариками с последующей виброшлифовкой



а)

б)

Рис. 5. Рабочая поверхность зубьев шестерни:
а — прошедших отделочно-упрочняющую обработку методами ППД после наработки 310 ч; *б* — без упрочнения после наработки 300 ч

нологии ППД детали имеют более выраженные пятна контакта (рис. 5, *б*), что в последующих испытаниях приводило к возникновению выкрашиваний рабочих поверхностей зубьев шестерен. В настоящее время испытания по увеличению ресурсных показателей главных редукторов продолжаются.

Выводы

1. Обработка шестерен методами ППД выбранными способами приводит к стабилизации и увеличению остаточных напряжений сжатия на поверхности деталей.

2. Обработка цементованных поверхностей деталей выбранными методами ППД не приводит к изменению геометрических размеров. Таким об-

разом, обработку цементованных шестерен можно внедрять без дополнительных затрат на отработку и изменение технологического процесса производства деталей.

3. После обработки методами ППД на поверхности детали отсутствуют направленные риски от шлифовки, поверхности деталей имеют однородный рисунок.

4. Разработанные технологические процессы обработки деталей методами ППД могут быть рекомендованы для серийного производства. Оборудование, используемое при выполнении вышеуказанного технологического процесса, разработанное в АО "МВЗ им. М.Л. Миля", обеспечивает стабильность результатов и может быть рекомендовано для серийного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кудрявцев И.В.** Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности деталей машин. М.: Машиностроение, 1969. 100 с.
2. **Пратусевич Р.М.** Упрочнение поверхностным наклепом зубчатых колес металлорежущих станков. М.: НИИИФОРМТЯЖМАШ, 1970.
3. **Петросов В.В.** Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. М.: Машиностроение, 1977. 168 с.
4. **Суслов А.Г.** Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. В 2 т. Т. 2. М.: Машиностроение, 2014. 444 с.
5. **Одинцов Л.Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
6. **Бойцов В.Б., Чернявский А.О.** Технологические методы повышения прочности и долговечности. М.: Машиностроение, 2005. 128 с.

УДК 621.787.4

С.А. Зайдес, Нгуен Ван Хинь
(Иркутский национальный исследовательский технический университет)
E-mail: zsa@istu.edu

Оценка напряженного состояния цилиндрических деталей, упрочненных осциллирующим выглаживанием

Рассмотрена отделочно-упрочняющая технология цилиндрических деталей типа валов осциллирующим выглаживанием. На основе компьютерного моделирования разработана конечно-элементная модель осциллирующего выглаживания для определения напряженного состояния в очаге деформации и остаточных напряжений в упрочненных деталях в зависимости от режимов обработки. Снижение подачи рабочего инструмента, повышение величины натяга, частоты вращения заготовки и частоты осцилляции рабочего инструмента приводят к увеличению сжимающих остаточных напряжений.

Ключевые слова: *осциллирующее выглаживание, шероховатость, микротвердость, микроструктура, остаточное напряжение, подача, натяг, осцилляция рабочего инструмента.*

The finishing-strengthening technology of cylindrical parts such as shafts by oscillating burnishing is considered. On the basis of computer modeling finite-element model of oscillating burnishing is developed to determine the stress state in the deformation zone and the residual stresses in the hardened parts, depending on the processing modes. Reducing of the working tool feed, increasing of tension, rotational speed of the workpiece and the oscillation frequency of the working tool leads to increase in compressive residual stresses.

Keywords: *oscillating burnishing, roughness, microhardness, microstructure, residual stress, feed, tension, oscillation of working tool.*

Введение

Работоспособность машин, механизмов, технологических, транспортных и других технических систем во многом зависит от качества деталей и узлов, из которых состоят конструкции. Качество деталей машин характеризуется геометрическими параметрами и состоянием поверхностного слоя, который контактирует с другой поверхностью или с окружающей средой. Из экономических соображений конструкторы и технологи обычно стремятся изготавливать детали из более дешевого мате-

риала, а наиболее ответственный поверхностный слой дополнительно обрабатывать для придания необходимых эксплуатационных свойств.

Разработан ряд технологий, применяемых для повышения качества поверхностного слоя деталей машин [1—6]. Среди большого многообразия способов физических воздействий на поверхностный слой деталей отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием нашла широкое применение в заводской практике [5, 6]. Экономичность, производительность, эффективность при формировании показателей качества упрочненного слоя — основные достоинства данного вида обработки.

По кинематике схем деформирования большинство статических способов ППД подразделяют на два класса: деформирование поверхностного слоя качением рабочего инструмента (шарики, ролики, диски) и пластическое деформирование скольжением (алмазные и металлические инденторы).

Если оценить реальную степень использования этих способов, то обработка качением имеет явный приоритет, благодаря возможности упрочнения широкого класса деталей машин. Эффективность обработки скольжением в некоторых случаях гораздо выше качения, но низкие производительность и стойкость рабочего инструмента ограничивают более широкое внедрение этого способа упрочнения на производстве.

В некоторых случаях проблему износа рабочего инструмента на практике удается решить за счет использования алмазных наконечников [7]. Однако при низкой производительности для использования алмазного выглаживания необходимо высокое качество исходной поверхности и отсутствие биения обрабатываемой заготовки. Этот способ применяется в основном для обработки ответственных и точных деталей машин.

В связи с вышеизложенным, была поставлена задача — разработать способ и оборудование для выглаживания поверхностного слоя, которое было бы лишено указанных недостатков. Новый способ упрочнения должен быть достаточно производительным, рабочий инструмент должен обладать повышенной износостойкостью, поверхность обрабатываемой детали должна быть обеспечена обычной лезвийной обработкой. Такой способ выглаживания и рабочий инструмент были созданы; новизна технических решений подтверждена патентами РФ на изобретение [8, 9].

Каждый параметр ППД в той или иной степени влияет на интенсивность упрочнения поверхностного слоя. Следовательно, исследование интенсивности пластических деформаций позволяет проводить оценку самых разнообразных факторов с точки зрения их влияния на развитие пластической деформации в поверхностном слое. Исследование напряженно-деформированного состояния в процессах ППД отражено в работах В.М. Смелянского [10], В.Ю. Блюменштейна [11], М.Е. Попова [12] и других исследователей. Что касается технологии осциллирующего выглаживания, то ранее были проведены исследования по влиянию геометрии и положения рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние упрочненных деталей [13].

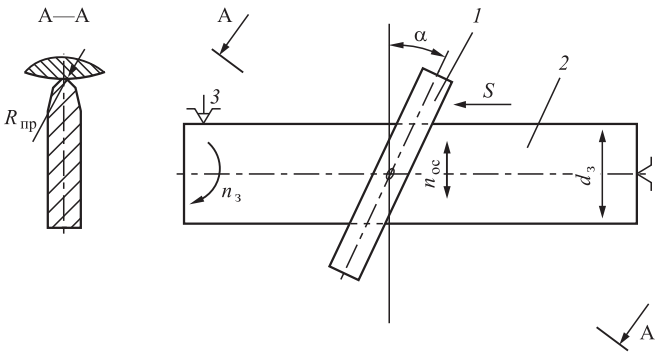


Рис. 1. Схема процесса осциллирующего выглаживания цилиндрических деталей:
1 — деформирующий инструмент; *2* — обрабатываемая заготовка

Цель данной работы — оценка напряженного состояния в зоне деформирования и остаточных напряжений в цилиндрических деталях в зависимости от основных параметров осциллирующего выглаживания.

Для повышения производительности обработки, износостойкости и получения необходимой текстуры поверхностного слоя в процессе выглаживания в качестве рабочего инструмента использовали пластину, имеющую скругление на одном из торцов по радиусу ($R_{пр}$). Эта часть пластины является рабочим элементом, который прижимается к вращающейся обрабатываемой заготовке. Пластина может поворачиваться относительно вертикальной плоскости на некоторый угол α (рис. 1), а также совершать осциллирующее вертикальное движение относительно оси заготовки и перемещаться в осевом направлении по направлению подачи *S*. Принципиальная схема осциллирующего выглаживания и конструкция установки, на которую получен патент РФ, изложены в работах [8, 9].

Методика моделирования

Для оценки напряженного состояния цилиндрических деталей, упрочненных осциллиру-

ющим выглаживанием, использовали компьютерное моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Одной из универсальных и широко применяемых программ, реализующих МКЭ, является ANSYS [14—16]. Программа предназначена для математического моделирования различных физических процессов. Моделирование процесса обкатки в программе ANSYS позволяет определить все необходимые параметры: напряженно-деформированное состояние заготовки и инструмента в любой точке и в любой момент времени, что необходимо при разработке оптимального технологического процесса и для глубокого анализа и понимания процессов, происходящих в заготовке при пластическом течении материала.

Для проведения расчетов в программе ANSYS была построена конечно-элементная модель в виде цилиндра и пластины (рис. 2). Инструмент *1* совершает осциллирующее вертикальное движение $n_{ос}$ относительно оси заготовки и перемещается в осевом направлении по направлению продольной подачи *S*, а также прижимается к вращающейся обрабатываемой заготовке *2*.

Параметры моделирования: конечно-элементная форма — гексаэдр; сгущение 7616 элемента, 39864 узлов; контакт с трением $f = 0{,}1$. Граничное условие: фиксирование продольной оси заготовки. Режимы обработки: частота вращения заготовки $n_з = 100$ мин$^{-1}$; угол наклона инструмента $\alpha = 0°$; частота осцилляции рабочего инструмента $n_{ос} = 30$ дв. ход/мин; натяг $t = 0{,}10$ мм; амплитуда осцилляции деформирующего инструмента $e = 30$ мм; подача инструмента $s = 0{,}14$ мм/об.

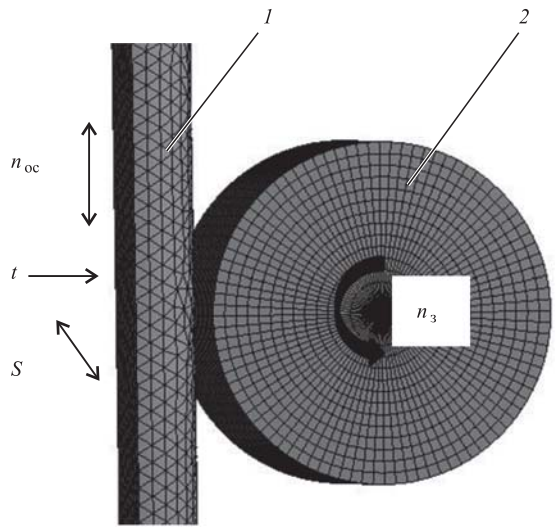


Рис. 2. Конечно-элементная модель процесса осциллирующего выглаживания цилиндрических деталей:
1 — деформирующий инструмент; *2* — обрабатываемая заготовка

Характеристики образца: форма поверхности — цилиндрическая диаметром $d_з = 20$ мм; материал сталь 45 — упругопластический, упрочняющийся; модуль упругости $E = 2{\cdot}10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}3$; диаграмма деформирования материала — билинейная, описываемая пределом текучести $\sigma_т = 360$ МПа, временным сопротивлением разрыву $\sigma_в = 600$ МПа, модулем упрочнения $E_т = 1{,}45{\cdot}10^3$ МПа.

Характеристики рабочего инструмента: материал — быстрорежущая сталь Р18; модуль упругости $E = 2{,}28{\cdot}10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}3$.

Результаты моделирования

Напряженно-деформированное состояние материала при деформационном упрочнении можно разделить на временное и остаточное. Первое возникает при действии внешних сил, второе — при их отсутствии. Временные напряжения влияют на энергосиловые характеристики процесса, степень и глубину упрочненного слоя, давление в зоне контакта, шероховатость поверхности заготовки, прочность и стойкость деформирующего инструмента.

Напряженное состояние в любой точке тела удобно оценивать по интенсивности напряжения σ_i, которое можно рассчитать по формуле [17]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{[(\sigma_z - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\varphi - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2]},$$

где σ_z — осевое напряжение; σ_φ — тангенциальное напряжение; σ_r — радиальное напряжение.

На рис. 3 (см. обложку) приведены для примера поля распределения временных напряжений по поперечному сечению цилиндра при $R_{пр} = 2$ мм; $\alpha = 60°$; $t = 0{,}10$ мм; $n_з = 100$ мин$^{-1}$; $n_{ос} = 30$ дв. ход/мин; $S = 0{,}14$ мм/об.

На рис. 4 для примера показано распределение остаточных и временных напряжений по сечению упрочненного цилиндрического образца.

Установлено, что при осциллирующем выглаживании формируются остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое и остаточные напряжения растяжения в центральной зоне заготовки. Максимальное остаточное напряжение сжатия наблюдается на расстоянии 1,6...1,8 мм от поверхности цилиндра.

Рассмотрим влияние основных параметров осциллирующего выглаживания на напряженное состояние изделий.

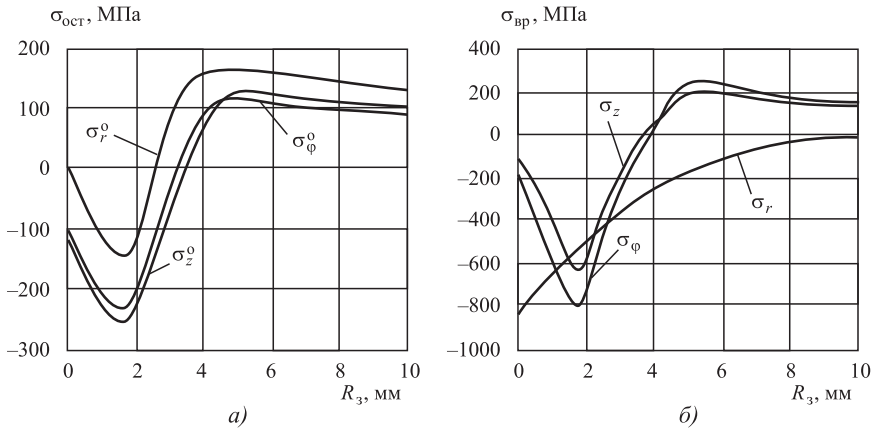


Рис. 4. Распределение напряжений по сечению цилиндрического образца: *а* — остаточные напряжения; *б* — временные напряжения

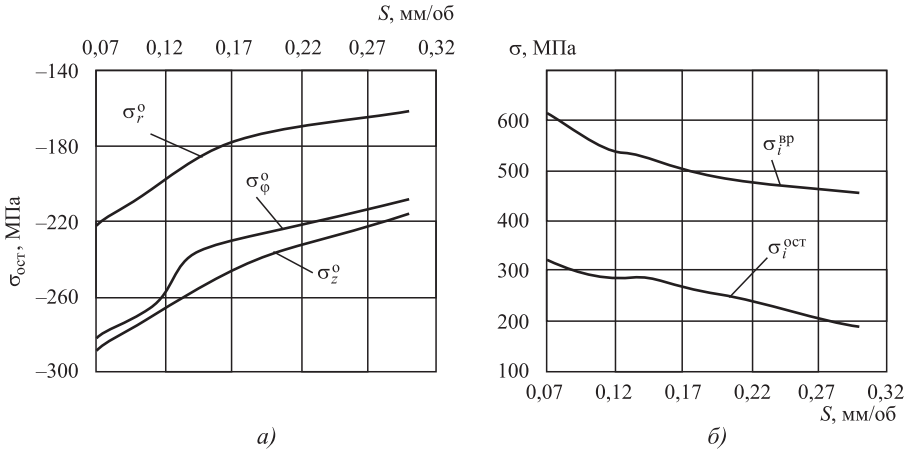


Рис. 5. Зависимости максимальных значений компонент остаточных напряжений, интенсивности временных и остаточных напряжений от продольной подачи: *а* — компоненты остаточных напряжений; *б* — интенсивность временных ($\sigma_i^{вр}$) и остаточных ($\sigma_i^{ост}$) напряжений

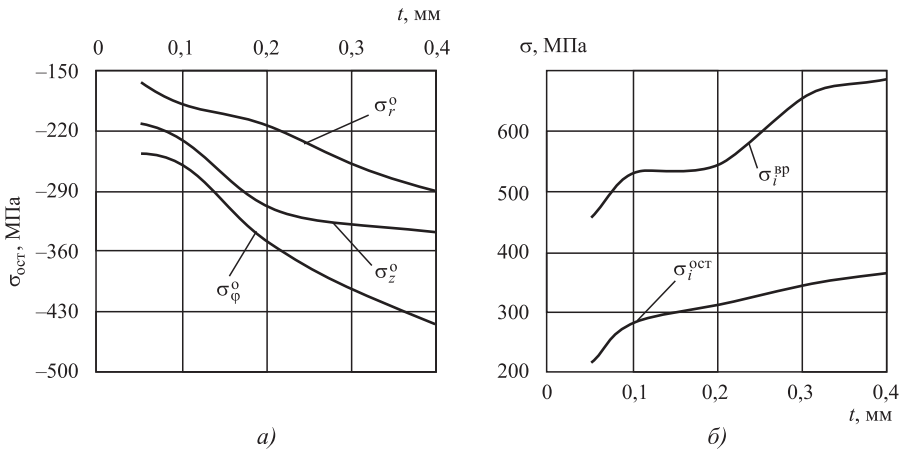


Рис. 6. Зависимости максимальных значений компонент остаточных напряжений, интенсивности временных и остаточных напряжений от величины натяга: *а* — компоненты остаточных напряжений; *б* — интенсивность временных ($\sigma_i^{вр}$) и остаточных ($\sigma_i^{ост}$) напряжений

Влияние продольной подачи. Продольную подачу *S* изменяли от 0,07 до 0,3 мм/об. На рис. 5 представлены зависимости максимальных значений компонент остаточных напряжений, интенсивности временных и остаточных напряжений от величины продольной подачи.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что при увеличении подачи рабочего инструмента от 0,07 до 0,3 мм/об происходит уменьшение осевых остаточных напряжений сжатия на 25 %, тангенциальных на 26 % и радиальных на 27 %. Чем больше продольная подача, тем меньше интенсивность остаточных напряжений.

При подачах рабочего инструмента менее 0,1 мм/об интенсивность остаточных напряжений приближается к пределу текучести материала, а интенсивность временных напряжений — к пределу прочности материала. Эти результаты подтверждают известное в практике явление перенаклепа, которое возникает при многократном нагружении упрочняемой зоны заготовки.

Влияние величины натяга. Величину натяга *t* изменяли от 0,05 до 0,4 мм. На рис. 6 представлены зависимости максимальных значений компонент остаточных напряжений, интенсивности временных и остаточных напряжений от величины натяга.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что повышение натяга от 0,05 до 0,4 мм приводит к увеличению осевых остаточных напряжений сжатия на 64 %, тангенциальных на 99 % и радиальных на 98 %. Чем больше величина натяга, тем выше интенсивность остаточных напряжений. Натяг является эффективным параметром обработки, влияющим

на формирование сжимающих остаточных напряжений. Следует отметить, что при натяге 0,25...0,30 мм возможен перенаклеп материала, так как рабочие напряжения достигают предела прочности материала.

Влияние частоты вращения заготовки. Частоту вращения заготовки $n_з$ изменяли от 50 до 400 мин$^{-1}$. На рис. 7 представлены зависимости максимальных значений компонент остаточных напряжений, интенсивности временных и остаточных напряжений от частоты вращения заготовки.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что при увеличении частоты вращения заготовки от 50 до 250 мин$^{-1}$ осевые остаточные напряжения сжатия возрастают на 24 %, тангенциальные на 18 %, а радиальные снижаются на 23 %. Чем больше частота вращения заготовки, тем выше интенсивность остаточных напряжений. Расчеты показывают, что частота вращения заготовки тоже оказывает существенное влияние на напряженное остаточное упрочненных деталей. При данных условиях и режимах обработки она не должна превышать 300 мин$^{-1}$.

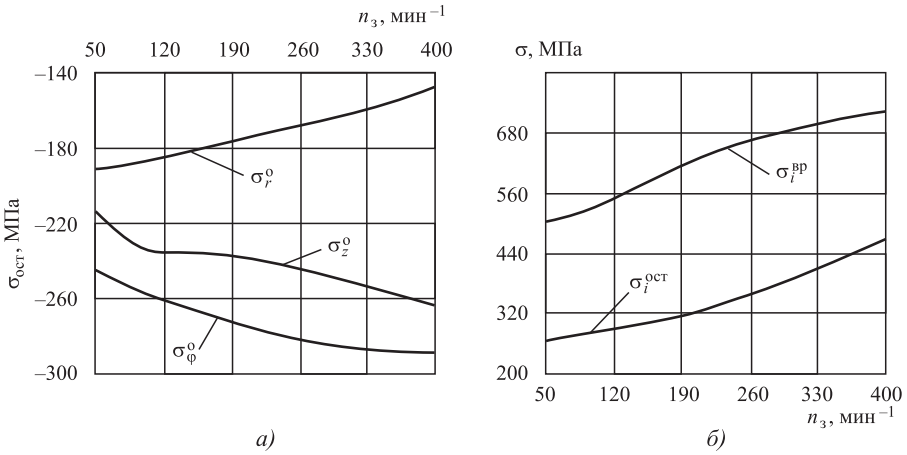


Рис. 7. Зависимости максимальных значений компонент остаточных напряжений, интенсивности временных и остаточных напряжений от частоты вращения заготовки:
а — компоненты остаточных напряжений; *б* — интенсивность временных ($\sigma_i^{вр}$) и остаточных ($\sigma_i^{ост}$) напряжений

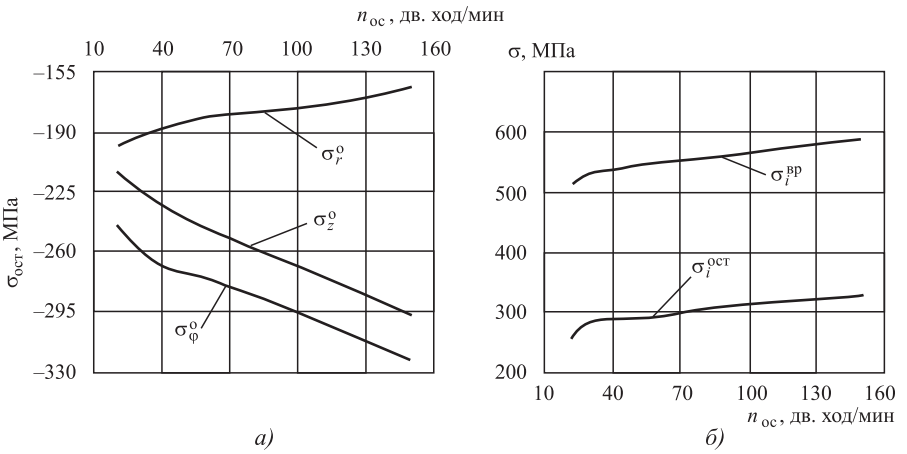


Рис. 8. Зависимости максимальных значений компонент остаточных напряжений, интенсивности временных и остаточных напряжений от частоты осцилляции рабочего инструмента:
а — компоненты остаточных напряжений; *б* — интенсивность временных ($\sigma_i^{вр}$) и остаточных ($\sigma_i^{ост}$) напряжений

Влияние частоты осцилляции рабочего инструмента. Режимы обработки: частота вращения заготовки $n_з = 100$ мин$^{-1}$; угол наклона инструмента $\alpha = 0°$; частота осцилляции рабочего инструмента $n_{ос} = 30$ дв. ход/мин; натяг $t = 0{,}1$ мм; амплитуда осцилляции деформирующего инструмента $e = 30$ мм; подача инструмента $s = 0{,}14$ мм/об.

Частоту осцилляции рабочего инструмента $n_{ос}$ изменяли от 20 до 150 дв. ход/мин. На рис. 8 представлены зависимости максимальных значений компонент остаточных напряжений, интенсивности временных и остаточных напряжений от частоты осцилляции рабочего инструмента.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что увеличение частоты осцилляции инструмента от 20 до 150 дв. ход/мин приводит к повышению осевых остаточных напряжений сжатия на 40 %, тангенциальных на 33 %, а радиальные напряжения при этом уменьшаются на 17 %. Чем больше частота осцилляции рабочего инструмента, тем выше интенсивность остаточных напряжений. При этом следует отметить, что степень воздействия осцилляции на напряженное состояние заготовки, по сравнению с другими параметрами процесса выглаживания, значительно ниже (см. рис. 8, *б*).

Влияние геометрии и положения рабочего инструмента, которое характеризуется углом его поворота α (см. рис. 1), рассмотрено ранее в работе [12].

Результаты компьютерного моделирования показывают, что при повышении профильного радиуса деформирующего инструмента (от 1 до 8 мм) интенсивность сжимающих остаточных напряжений увеличивается на 45 %. При постоянном натяге с повышением профильного радиуса деформирующего инструмента происходит рост контактной поверхности и контактного давления [12]. Чем больше контактное давление, тем выше остаточные напряжения. Это позволяет объяснить некоторую разницу в величинах остаточных напряжений при изменении профильного радиуса рабочего инструмента [5].

Увеличение угла поворота рабочего инструмента в направлении против часовой стрелки (от 0 до −40°) приводит к повышению интенсивности остаточных напряжений на 34 % по сравнению с напряжениями при $\alpha = 0°$. При увеличении угла поворота рабочего инструмента от −45 до −85° остаточные напряжения резко возрастают, но при этих условиях начинает разрушаться поверхностный слой вследствие перенаклепа металла. При осциллирующем выглаживании инструментом с углом поворота $\alpha = -85°$ получено максимальное значение интенсивности временных напряжений $\sigma_i^{вр} = 745$ МПа. При указанных режимах обработки происходит повреждение поверхностного слоя, так как интенсивность напряжения достигает предела прочности материала. Увеличение угла поворота инструмента по часовой стрелке (от 0 до +45°) приводит к уменьшению остаточных напряжений на 89 %, а увеличение угла α рабочего инструмента от +45 до +85° — к повышению напряжений на 110 % [12].

Результаты компьютерного моделирования и расчеты НДС заготовки позволили получить следующую информацию по отделочно-упрочняющей обработке цилиндрических деталей осциллирующим выглаживанием.

Численными расчетами установлено состояние поверхностного слоя в зависимости от режимов и параметров технологического процесса выглаживания. Поверхностный слой может находиться в состоянии пластического течения, которое способствует повышению механических свойств и упрочению материала. При некоторых режимах обработки материал исчерпывает запас пластичности, уровень дислокаций достигает своего предела для данного материала, прочность достигает предельной величины и материал поверхностного слоя разрушается (в виде отслоений).

Таким образом, информация об интенсивности напряжений в зоне деформации позволит назначать режимы осциллирующего выглаживания, при которых не произойдет исчерпания запаса пластичности материала упрочненного слоя.

Другая важная информация, полученная в работе, касается остаточных напряжений, сформированных в деталях, упрочненных осциллирующим выглаживанием. Было установлено, что при всех режимах обработки, которые использованы в работе, в поверхностных слоях упрочненных деталей машин формируются остаточные напряжения сжатия. Глубина залегания напряжений сжатия находится в пределах $(0{,}6...1{,}2)R_з$. Максимальное напряжение сжатия находится не на поверхности детали, а в некоторой глубине составляющей $(0{,}16...0{,}18)R_з$ ($R_з$ — радиус заготовки).

Расчеты показали, что технологические параметры и режимы осциллирующего выглаживания позволяют в достаточно широких пределах изменять величину остаточных напряжений сжатия и влиять на качество поверхностного слоя.

Выводы

1. На основе компьютерного моделирования разработана конечно-элементная модель осциллирующего выглаживания для определения напряженного состояния в очаге деформации и остаточных напряжений в упрочненной детали в зависимости от режимов обработки. Полученные результаты исследования достаточно хорошо согласуются с физическими закономерностями образования остаточных напряжений при упругопластическом деформировании. Чем больше величина пластической деформации, тем выше остаточные напряжения сжатия.

2. Увеличение подачи рабочего инструмента от 0,07 до 0,3 мм/об приводит к уменьшению остаточных напряжений на 25...30 %, а увеличение величины натяга от 0,05 до 0,4 мм — к увеличению остаточных напряжений сжатия почти на 100 %.

3. При увеличении частоты вращения заготовки от 50 до 250 мин$^{-1}$ остаточные напряжения сжатия возрастают на 20...25 %, а увеличение частоты осцилляции инструмента от 20 до 150 дв. ход/мин приводит к повышению осевых и тангенциальных напряжений сжатия на 35...40 %, радиальные напряжения при этом уменьшаются на 17 %.

4. Результаты компьютерного моделирования позволили установить параметры и режимы осциллирующего выглаживания, при которых может проявляться перенаклеп упрочненного материала. Полученные результаты согласуются с данными практической технологии упрочнения деталей машин ППД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Bobrovskij I.N.** 2018 Burnishing Systems: a Short Survey of the State-of-the-art ATCES 2017 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 302 012041.
2. **Grigoriev S.N., Bobrovskij N.M., Melnikov P.A., Bobrovskij I.N.** 2017 Research of Tool Durability in Surface Plastic Deformation Processing by Burnishing of Steel Without Metalworking Fluids IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 66 (1) 012013.
3. **Шнейдер Ю.Г.** Технология финишной обработки давлением: справочник. СПб.: Политехника, 1988. 414 с.
4. **Реслер И., Хардерс Х., Бекер М.** Механическое поведение конструкционных материалов. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 502 с.
5. **Папшев Д.Д.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 152 с.
6. **Емельянов В.Н.** Правка деталей машин поверхностным пластическим деформированием. Новгород: НовГУ, 1996. 127 с.
7. **Торбило В.М.** Алмазное выглаживание. М.: Машиностроение, 1972. 104 с.
8. **Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь, Фам Дак Фыонг.** Способ поверхностного пластического деформирования: патент 2657263 от 09.06.2018.
9. **Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь, Фам Дак Фыонг.** Устройство для поверхностного пластического деформирования: патент 2626522 от 28.07.2017.
10. **Смелянский В.М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 299 с.
11. **Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М.** Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение-1, 2007. 400 с.
12. **Зайдес С.А., Емельянов В.Н., Попов М.Е. и др.** Деформирующая обработка валов. Иркутск: ИрГТУ, 2013. 449 с.
13. **Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь.** Влияние направления и геометрии рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние при осциллирующем выглаживании цилиндрических деталей // Известия вузов. Машиностроение. 2018. № 8. С. 57—69.
14. **Баков К.А.** ANSYS. Справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.
15. **Инженерный** анализ в Ansys Workbench. Ч. 1 / В.А. Бруяка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова и др. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 271 с.
16. **Finite** Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench / Chen Xiaolin, Liu Yiijun: CRC Press, 2014. 411 p.
17. **Калчев М.И.** Деформационное упрочнение металлов. Минск: Наука, 1980. 255 с.

УДК 621.787

Ю.Р. Копылов *(Воронежский государственный технический университет),*
А.Н. Скляренко, А.В. Глазков
(Военное представительство Министерства обороны Российской Федерации)
E-mail: Alwexkurok@mail.ru

Анализ работ по влиянию параметров качества упрочненного поверхностного слоя изделий с ограниченным запасом прочности на его сопротивление усталости

Рассмотрены актуальность и возможность оценки запаса сопротивления усталости по параметрам качества изделий. Дан прогноз запаса сопротивления усталости рабочего колеса турбонасосного агрегата по параметрам качества, получаемым в каждой технологической операции. Доказана необходимость внесения в конструкторскую и технологическую документацию изделия параметров качества после различных операций при изготовлении, непосредственно влияющих на эксплуатационные характеристики изделия.

Ключевые слова: *сопротивление усталости, параметры качества.*

The actuality and the possibility of estimating of the fatigue strength margin according to the products quality parameters are considered. Forecast is given for the fatigue strength of the impeller of turbo-pump assembly in terms of the quality parameters obtained in each technological operation. It is proved that it is necessary to include quality parameters in the design and technological documentation of the product after various manufacturing operations that directly affect the performance characteristics of the product.

Keywords: *fatigue strength, quality parameters.*

В настоящее время показатели надежности изделий с ограниченным запасом прочности оцениваются по результатам их стендовых испытаний и эксплуатации. Такой метод дает достоверный результат, но оценка надежности проводится только после проведения испытаний. Главная за-

дача — успешный пуск ракеты-носителя, для чего необходимо произвести оценку показателей надежности расчетным методом на этапе разработки и изготовления изделий, проводя работы по отработке не только на технологичность, но и на технологическую надежность, что не исключает необходимости проведения контрольных стендовых испытаний перед пуском. В этом случае информация о показателях надежности появляется перед испытаниями и эксплуатацией, что позволяет снизить временны́е и финансовые затраты.

Наиболее нагруженной деталью, определяющей технологическую надежность, стоимость и трудоемкость изготовления турбонасосного агрегата, является турбина, которая работает в условиях высоких температур, напряжений и агрессивной среды продуктов сгорания топлива. Газовый поток, имеющий высокую скорость и переменное давление, оказывает химическое и знакопеременное механическое воздействие на поверхностный слой лопаток турбины, вызывая коррозионное и эрозионное разрушение.

Из анализа результатов испытаний ракетно-космической техники (РКТ) на номинальных и форсированных режимах установлено, что 30...50 % всех отказов двигателя происходит по технологическим причинам, возникающим на этапе изготовления заготовки РКТ. При этом основная причина отказов — наличие дефектов в поверхностном слое и растягивающих остаточных напряжений.

Для производства РКТ важно знать закономерности комплексного и раздельного влияния различных параметров качества поверхностного слоя на характеристики усталости конструкционных материалов в условиях циклического нагружения материала (изгиб, кручение, растяжение и сжатие при различных частотах нагружения, температурах в воздушной или коррозионной средах). Параметры качества должны быть регламентированы в конструкторской и технологической документации при разработке изделий и корректироваться по результатам испытаний и эксплуатации. Однако в некоторых конструкторских и технологических документах требования к нормативным значениям параметров качества отсутствуют, и поэтому их реальные значения в ряде случаев не контролируются.

Рассмотрим жидкостный ракетный двигатель с нормативным значением коэффициента запаса прочности его деталей 1,4...1,6, который обуславливается в значительной мере параметрами качества материала и поверхностного слоя деталей на всех операциях при изготовлении (литье, пескоструйная обработка, химическая пассивация и виброударное упрочнение проточных каналов рабочего колеса турбонасосного агрегата). Например, даже при точном литье могут возникать дефекты, которые снижают запас сопротивления усталости (засоры, усадочные раковины и пористость, трещины и др.). В этой связи необходимо учесть влияние всех операций технологического процесса как на прочность материала, так и на другие критические параметры, которые влияют на работоспособность изделия (КПД, сопротивление усталости, гидравлическое сопротивление, напор и т.д.).

Типовой технологический процесс изготовления рабочего колеса турбины предусматривает пескоструйную обработку, слесарную зачистку, химическую пассивацию, высокотемпературную газостатическую обработку, термическую обработку, нанесение защитных покрытий, виброабразивную обработку и виброударное упрочнение.

Для закрытых поверхностей, недоступных для лезвийного и абразивного инструментов, и проточных каналов крыльчаток рабочих колес для финишной обработки применяются технологии виброабразивной обработки и виброударного упрочнения. В результате образуется сплошной равномерно сформированный поверхностный слой, характеризующийся пониженной высотой и увеличенным радиусом выступов микронеровностей, наличием сжимающих остаточных напряжений и наклепа, измельченной структурой кристаллического строения [1].

Виброабразивная обработка при неудачно выбранных режимах не удаляет дефектный слой, а упрочнение по дефектному слою, образованному в результате предшествующих операций изготовления, снижает сопротивление усталости, долговечность и надежность РКТ. Поэтому необходимо перед упрочнением удалить дефектный поверхностный слой толщиной до 70 мкм.

После проведения виброабразивной обработки диапазон рассеяния действительных значений $Ra_{\min}$ составляет 3,6...5,1 мкм, а $Ra_{\max}$ = 5,1...6,4 мкм.

В настоящее время оценка влияния параметров качества рабочего колеса турбины ракетного двигателя после каждой технологической операции изготовления изделия на сопротивление усталости, а также анализ технологической наследственности предыдущих операций изготовления, как правило, не проводится.

Шероховатость. Влияние шероховатости поверхности на сопротивление усталости, по сравнению с другими параметрами качества поверхностного слоя деталей, наиболее изучено, в том числе с учетом температуры и частоты нагруже-

ния [2]. В работе [3] изменение сопротивления усталости в зависимости от шероховатости поверхности оценивается коэффициентом $k_{уст}^{Rz}$, зависящим от вида обработки:

$$\Delta\sigma_{уст} = 1 + k_{уст}^{Rz}\sigma_{-1},$$

где σ_{-1} — предел выносливости при изгибе.

В работе [4] влияние шероховатости на усталость металла оценивают с помощью коэффициента концентрации напряжений:

при кручении и сдвиге

$$k_{кц}^{\sigma} = 1 + \sqrt{k_{Sh}\left(\frac{Rz}{r_{вп}}\right)};$$

при растяжении и изгибе

$$k_{кц}^{\sigma} = 1 + 2\sqrt{k_{Sh}\left(\frac{Rz}{r_{вп}}\right)},$$

где $k_{Sh} = f\left(\frac{S}{Rz}\right)$ — коэффициент соотношения шага S и высоты микронеровностей Rz; $r_{вп}$ — радиус впадины.

При механической обработке $\left(\frac{Rz}{r_{вп}}\right) = 0,3\ldots0,5$, $k_{Sh} \approx 1,0$, коэффициент концентрации $k_{кц}^{\sigma} = 1,5\ldots2,5$. При шлифовании с параметром шероховатости Ra = 0,32; 0,63; 1,25 мкм коэффициент концентрации соответственно равен: $k_{кц}^{\sigma}$ = 1,2; 1,24; 1,48. С учетом чувствительности металла $q_{кц}$ = 0,1...0,2 к воздействию на него концентраторов напряжений, суммарное их влияние можно оценить зависимостью:

$$k_{\Sigma кц}^{\sigma} = 1 + q_{кц}^{\sigma}(k_{кц}^{\sigma} - 1).$$

Для механической обработки суммарное влияние концентраторов напряжений $k_{\Sigma кц}^{\sigma} = 1,05\ldots1,30$. Бóльшие значения относятся к легированным сталям.

Сопротивление усталости, износ, сухое, гидро- и аэродинамическое трение, прочность прессовых соединений зависят не только от высоты неровностей, но и от радиусов выступов и впадин, угла наклона профиля и шага неровностей.

В работе [4] коэффициент концентрации напряжений выражается через вероятностные показатели n-х гармоник амплитуды A_{Rz}^{n} и шага S_{Rz}^{n} профиля микронеровностей:

$$k_{кц}^{\sigma} = 1 + 0,018\sqrt{k_{Sh}\frac{A_{Rz}^{n}}{S_{Rz}^{n}}}.$$

Задавшись допустимой величиной коэффициента концентрации напряжений $k_{кц}^{\sigma}$, по этой формуле можно рассчитать требования к спектру профиля поверхности детали в виде максимально допустимого значения отношения амплитуды каждой гармоники к ее шагу. Зная удельный вес "опасных" гармоник в спектре профилей поверхностей, определяют приемлемое значение параметра

$$Ra = C_{Rz}\sum_{n=1}^{n_{max}}(0,5A_{Rz}^{n})^2,$$

где C_{Rz} — коэффициент корреляционной функции соответствующего профиля микронеровностей, определяемый для каждого вида обработки экспериментально или на основе исследования.

Используя справочные данные в [5], расчет коэффициента запаса прочности при отклонении значений шероховатости поверхностного слоя от требований технической документации можно проводить по формуле

$$k_{\sigma} = 1,4 - 1,4 \cdot 0,22\lg\Delta Rz\left(\lg\frac{\sigma_{в}}{20} - 1\right),$$

где ΔRz — прирост параметра шероховатости поверхностного слоя к нормативному значению; $\sigma_{в}$ — предел прочности материала рабочего колеса турбины, значение которого для материала ЖС3-ДК составляет 900 МПа.

Результаты расчета отображены на графике (рис. 1).

Расчетным путем установлено, что при наличии отклонений значений параметра шероховатости поверхностного слоя от требований технической документации коэффициент запаса прочности может снижаться с 1,40 до 1,23.

Наклеп может проявляться как внутри материала (в результате растяжения, сжатия, волочения, изгиба и кручения), так и на поверхности (после прокатки, поверхностного пластического деформирования детали при ее механической и (или) упрочняющей обработки).

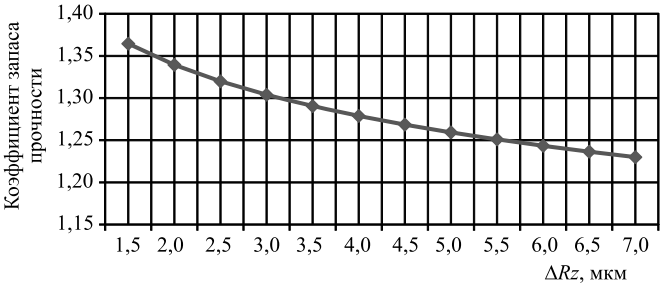


Рис. 1. Зависимость коэффициента запаса прочности рабочего колеса турбины от прироста параметра шероховатости

По данным работы [2], при увеличении степени деформации при сплошном наклепе при температуре, близкой к нормальной, сопротивление усталости углеродистых и легированных сталей возрастает. Влияние наклепа на усталость металлов при высоких температурах более сложное. Холодная деформация растяжением стальных сплавов ЭИ257 на 5...13 % повышает сопротивление усталости при 600 °С относительно недеформированного состояния на 19,2...11,5 %. В других работах показано, что холодная деформация жаропрочных сплавов ХН77ТЮ (ЭИ437А) и ХН77ТЮР (ЭИ437Б) растяжением на 10 и 20 % снижает сопротивление усталости на 10...17 % при температуре нагрева 700 °С.

Доля влияния поверхностного наклепа в снижении сопротивления усталости при изгибе с вращением после механического упрочнения гладких стальных образцов составляет 65...75 %, доля влияния сжимающих остаточных напряжений — 25...35 %. Поверхностный наклеп после обкатки роликами повышает выносливость аустенитных сталей ЭИ123, ЭИ395 и ЭИ405 при температуре нагрева 600...750 °С на 11...33 %. Влияние наклепа после обкатки роликами на сопротивление усталости сплава ЭИ437Б при температурах испытания 700 и 800 °С зависит от базы испытания.

Анализ работ показал, что сопротивление усталости материалов в зависимости от степени наклепа в ходе упрочнения растет до некоторого предельного для данного материала значения. Дальнейшее упрочнение ведет уже к ее снижению за счет перенаклепа. На основании экспериментальных зависимостей авторами получена эмпирическая зависимость:

$$\sigma_{-1} = 3{,}75U^4 - 42{,}5U^3 + 151U^2 - 172U + 264,$$

где U — степень наклепа.

В работе [6] приведены экспериментальные данные, которые подтверждают экстремальную зависимость, представленную на рис. 2, и подтверждают, что процесс упрочнения за определенное время достигает критического порога, после чего начинается разупрочнение (или перенаклеп).

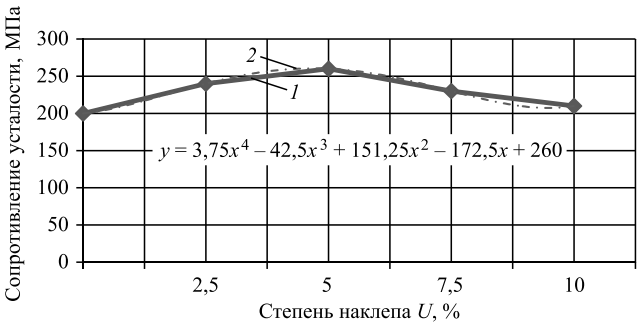


Рис. 2. Зависимость сопротивления усталости рабочего колеса турбины от степени наклепа:
1 — по данным работы [3]; *2* — расчет

По мнению автора [6], в процессе упрочнения основные физико-механические характеристики качества поверхностного слоя (остаточные напряжения сжатия, степень и глубина наклепа) формируются одновременно, и практически трудно выделить влияние каждого из них на увеличение сопротивления усталости. Поэтому он предлагает для вычисления коэффициента влияния остаточных напряжений и степени наклепа на сопротивление усталости k_v использовать формулу:

$$k_v = \frac{k_a \Delta H}{1 - \dfrac{2h_н \chi}{S}},$$

где $k_a = \sqrt{1 - \dfrac{\sigma_{ост}}{\sigma_в}}$; ΔH — прирост микротвердости, который характеризуется отношением $\Delta H = \dfrac{H^{упр}}{H^{исх}}$; $h_н$ — глубина наклепа; $\chi = (\gamma - h_н)(\gamma - 1)^2$; γ — коэффициент, учитывающий несовпадение глубины наклепа с глубиной залегания остаточных напряжений.

Достоверность этой формулы автор проверил экспериментально [6]. Несовпадение расчетных и экспериментальных значений $k_v^р$ и $k_v^э$ составляет 8...12 %.

Технологические остаточные напряжения. Оценка влияния технологических остаточных напряжений, которые образуются в поверхностном слое изделий в результате финишных методов обработки и упрочнения, приведена в работе [7]. Формула для вычисления приращения предела выносливости Δp_R упрочненной детали с использованием критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ будет иметь вид:

$$\Delta p_R = \bar{\psi}_p |\bar{\sigma}_{ост}|,$$

где $\bar{\psi}_p$ — коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, которые вычисляются по формуле:

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi}\int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}}\, d\xi,$$

где σ_z — осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали; ξ — отношение глубины текущего слоя к максимальной глубине залегания остаточных напряжений.

Согласно данным, приведенным в работе [2], при виброударном упрочнении независимо от величины и знака имеющихся остаточных напряжений формируются сжимающие остаточ-

ные напряжения σ_{-0} с образованием на глубине $h_{\sigma_{max}} = 5...40$ мкм подслойного максимума $\sigma_{-0\,max}$. Распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя (рис. 3) зависит от времени и режимов виброударного упрочнения. Так, при косых соударениях $\gamma_{-} = 15...20°$ глубина расположения подслойного максимума уменьшается до $h_{\sigma_{max}} = 5...10$ мкм с возрастанием σ_{-0} до значений 640...660 МПа. При более значительных углах соударения $\gamma_{-} = 40...45°$ $h_{\sigma_{max}}$ вновь возрастает до 20...30 мкм с уменьшением значения $\sigma_{-0\,max}$ до 470 МПа. При виброударном упрочнении без применения технологической жидкости значение σ_{-0} у поверхности уменьшается до 150...300 МПа, что отрицательно сказывается на прочностных характеристиках поверхностного слоя.

Проведенные исследования в работе [7] на гладких образцах показали, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\overline{\sigma}_{ост}$ можно использовать и для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных гладких деталей, но лишь в том случае, когда сжимающие остаточные напряжения не изменяются под действием переменных нагрузок.

Рабочее колесо турбины работает при циклических нагружениях, при которых результирующее напряжение от совместного воздействия технологических и эксплуатационных напряжений не превышает предел упругости. В этом случае, согласно данным работы [1], эти напряжения алгебраически суммируются, снижая тем самым запас прочности в упругой области материала. По мнению автора, закономерность взаимодействия технологических и эксплуатационных остаточных напряжений в условиях циклического нагружения зависит от структурного состояния материала (наклепа), вида напряженного состояния, скорости нагружения (деформации), температуры, состава окружающей среды и других факторов. При циклических нагрузках, действующих на рабочее колесо турбины, может создаваться неоднородная по сечению детали остаточная деформация, следствием которой будет образование вторичных остаточных макро- и микронапряжений.

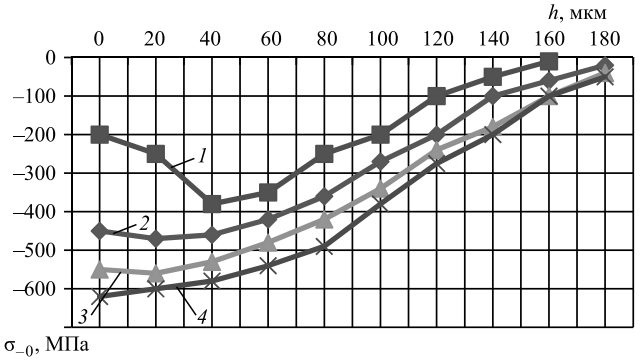


Рис. 3. Распределение напряжений σ_{-0} по глубине *h* при различном времени виброударного упрочнения *t* [2]: *1* — 15 мин; *2* — 30 мин; *3* — 45 мин; *4* — 60 мин

Выводы

1. При расчете сопротивления усталости изделий с ограниченным запасом прочности необходимо учитывать влияние параметров качества поверхностного слоя (шероховатость, степень наклепа и технологические остаточные напряжения поверхностного слоя) на всех операциях изготовления изделия.

2. При наличии отклонений значений шероховатости поверхностного слоя от требований технической документации коэффициент запаса прочности будет снижаться с 1,40 до 1,23, что не соответствует требованиям нормативной документации.

Неправильно выбранный режим упрочнения может привести к перенаклепу и, как следствие, к ухудшению состояния поверхностного слоя и снижению усталостной прочности изделия.

Технологические сжимающие остаточные напряжения повышают предел выносливости детали. Однако финишные методы обработки не полностью удаляют дефектный слой, в котором образуются технологические остаточные напряжения, которые в совокупности с эксплуатационными напряжениями могут снизить запас прочности детали.

3. В конструкторской и технологической документации необходимо указывать требования к параметрам качества, а также к порядку их достижения и контроля. Для этого должна быть разработана соответствующая организационная структура контроля качества предприятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Копылов Ю.Р.** Динамика процессов виброударного упрочнения. Воронеж: ИПЦ "Научная книга", 2011. 568 с.
2. **Копылов Ю.Р.** Виброударное упрочнение. Воронеж: ВИМВ РФ, 1999. 386 с.
3. **Сулима А.М.** Технологические остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.
4. **Брондз Л.Д.** Технологическое обеспечение ресурса и надежности самолета. М.: Машиностроение, 1991. 244 с.
5. **Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П.** Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: справочник. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
6. **Лебедев В.А.** Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования. Азов: АТИ ДГТУ, 2006.
7. **Павлов В.Ф., Кирпичев В.А., Вакулюк В.С.** Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. 125 с.

УДК 621.01

В.А. Лебедев, Ф.А. Пастухов, В.Д. Соколов, М.А. Бойко
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)
E-mail: va.lebediv@yandex.ru

Эффективность применения дополнительной упрочняющей обработки методом поверхностного пластического деформирования для повышения усталостной долговечности деталей

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния дополнительной упрочняющей обработки методом поверхностного пластического деформирования (ППД) на повышение усталостной долговечности деталей. Установлено, что применение упрочнения деталей в процессе эксплуатации эффективно при условии, если степень упрочнения поверхностного слоя, обеспечиваемая ППД, не превышает предельно допустимую величину, свойственную конкретному материалу.

Ключевые слова: *упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, усталостная долговечность.*

The results of experimental studies of the effect of additional hardening treatment by surface plastic deformation (SPD) to increase the fatigue life of parts are presented. It is established that the use of hardening of parts in the operation process effectively provided that the hardening degree of the surface layer provided by the SPD does not exceed the maximum permissible value inherent in particular material.

Keywords: *hardening, surface plastic deformation, fatigue life.*

Введение

Надежность и ресурс деталей машин в основном определяются качественным состоянием их поверхностного слоя, являющимся носителем конструктивных, технологических и эксплуатационных концентраторов напряжений, величина и характер которых предопределяют усталостное разрушение конструкции в процессе эксплуатации. Наиболее важные (с точки зрения эксплуатации) свойства поверхностного слоя деталей, определяющие усталостную долговечность, — шероховатость, микротвердость и уровень остаточных напряжений [1, 2].

Требуемые параметры качества поверхности и большинство важнейших эксплуатационных свойств деталей машин могут быть обеспечены их упрочнением поверхностным пластическим деформированием (ППД), максимально выявляющим потенциальные возможности материала. Упрочнение методом ППД приводит к повышению поверхностной твердости, образованию в поверхностных слоях деталей остаточных напряжений сжатия и благоприятному изменению микрогеометрии поверхностей. В результате, в зависимости от функционального назначения и условий эксплуатации деталей, повышается их усталостная и контактная прочность, износостойкость, коррозионная стойкость и т.д. [2].

Цель работы — изучение эффективности применения дополнительной упрочняющей обработки динамическими методами поверхностного пластического деформирования на повышение усталостной долговечности деталей в процессе их эксплуатации.

Методика экспериментальных исследований

В числе основных задач исследований были определены следующие:

1) обоснование эффективных режимов виброударной упрочняющей обработки образцов;

2) определение усталостной долговечности образцов, упрочненных по следующим регламентам:

Регламент 1 — виброударная обработка образцов в течение времени t, при котором достигаются наибольший эффект упрочнения У(t) и последующее их циклическое нагружение Тр(N) до разрушения, где N — число циклов до разрушения. При исследовании по этой схеме устанавливается влияние эффективной степени упрочнения образцов, зависящей в основном от времени упрочнения, на их усталостную долговечность.

Регламент 2 — виброударная обработка и циклическое нагружение образцов проводятся в два этапа. На первом этапе образцы обрабатываются в течение времени t_1 (составляет 50...60 % от времени t), обеспечивающего степень их упроч-

нения У(t_1), а затем подвергаются промежуточному циклическому нагружению $T_{пр}(N_1)$ при N_1 = = 20 тыс. циклов нагружения; на втором этапе образцы дополнительно обрабатываются на тех же режимах в течение времени t_2 (составляет 50...40 % от времени t). После дополнительного упрочнения У(t_2) образцы подвергаются дальнейшему циклическому нагружению $T_р(N_2)$ до разрушения. При исследовании по этой схеме устанавливается влияние дополнительного виброударного упрочнения на повышение усталостной долговечности, которая оценивается по суммарному числу циклов нагружения на первом N_1 и втором N_2 этапах.

Регламент 3 — виброударная обработка и циклическое нагружение образцов проводятся в три этапа. На первом этапе образцы обрабатываются в течение времени t_1 (составляет 30 % от времени t), обеспечивающего степень их упрочнения У(t_1), а затем подвергаются промежуточному циклическому нагружению $T_{пр}$ (N_1) при N_1 = 20 тыс. циклов нагружения. На втором этапе образцы дополнительно обрабатываются на тех же режимах в течение времени t_2 (составляет 30 % от времени t), обеспечивающего степень их упрочнения У(t_2). Затем их подвергают повторному промежуточному циклическому нагружению $T_{пр}$ (N_2) при N_2 = = 20 тыс. циклов нагружения. На третьем этапе образцы повторно дополнительно обрабатывают на тех же режимах в течение времени t_3 (составляет 30...40 % от времени t), обеспечивающего степень их упрочнения У(t_3). После повторного дополнительного упрочнения У(t_3) образцы подвергаются дальнейшему циклическому нагружению $T_р(N_3)$ до разрушения. При исследовании по этой схеме устанавливается влияние двойного дополнительного виброударного упрочнения на повышение усталостной долговечности, которая оценивается по суммарному числу циклов нагружения на первом N_1, втором N_2 и третьем N_3 этапах.

Регламент 4 предусматривал исследование влияния после деформационного отдыха (старения) О на усталостную долговечность образцов, упрочненных по регламенту 1.

Регламент 5 предусматривал исследование влияния последеформационного отдыха (старения) О на усталостную долговечность образцов, упрочненных по регламенту 2.

Упрочняющую обработку осуществляли виброударным методом ППД на лабораторной вибрационной установке УВГ 4×10. В качестве рабочей среды для виброударной обработки были использованы стальные закаленные шарики диаметром 5...8 мм. Условия эксплуатации образцов эмитировали на плоских образцах из алюминиевого сплава

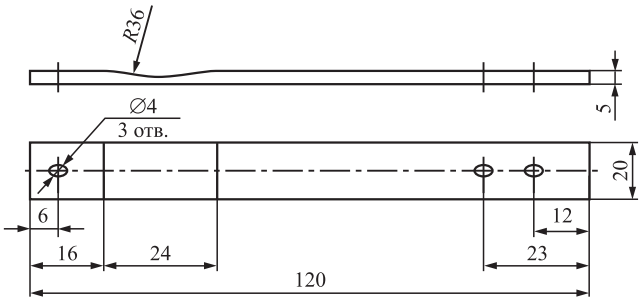


Рис. 1. Плоский образец для усталостных испытаний

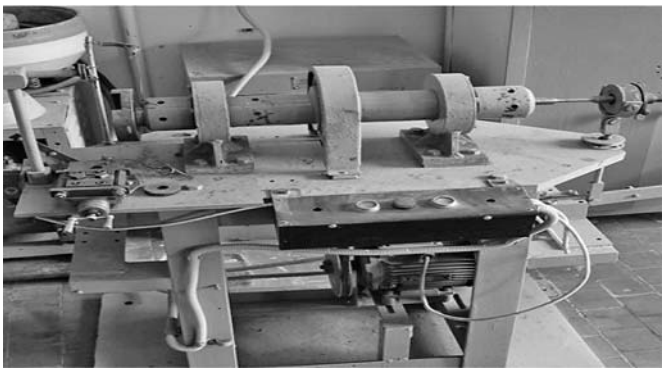


Рис. 2. Машина для испытаний на усталостную долговечность УИ-20

Д16Т с концентратором напряжений (рис. 1), подвергаемых поперечному изгибу в одной плоскости на установке для усталостных испытаний УИ-20 (рис. 2). Затем деформационный отдых упрочненных образцов проводили путем выдержки их при температуре 18...20 °С течение 3...18 суток.

В качестве критерия для обоснования оптимальных режимов виброударной обработки (частоты f, амплитуды A, времени обработки t) была выбрана физико-механическая характеристика качества поверхностного слоя, формируемого в процессе обработки, сжимающие остаточные напряжения, оцениваемые по величине стрелы прогиба плоских образцов.

Результаты исследований влияния дополнительной виброударной упрочняющей обработки на усталостную долговечность

На рис. 3, 4 представлены результаты исследований влияния продолжительности виброударной обработки на изменение физико-механических характеристик качества поверхностного слоя.

Установлено, что при частоте колебаний 33 Гц, амплитуде колебаний 2,5...3,5 мм максимальный прирост величины прогиба образца-свидетеля и как следствие наибольший эффект упрочнения,

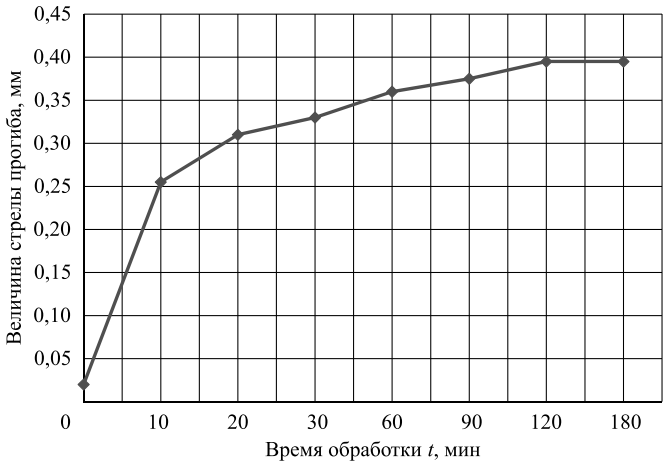


Рис. 3. Влияние времени обработки на величину стрелы прогиба образцов

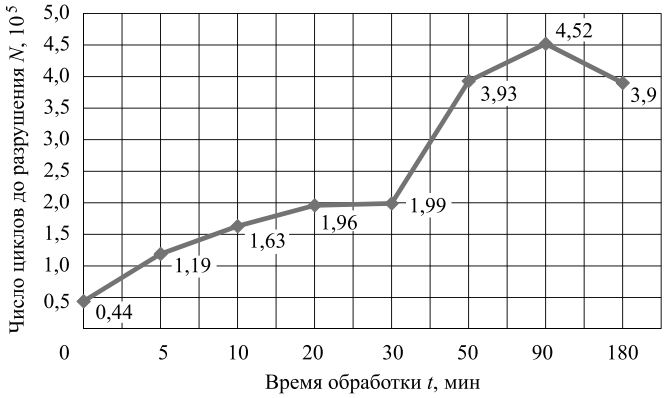


Рис. 4. Изменение усталостной долговечности образцов в зависимости от продолжительности их упрочнения ППД

Усталостная долговечность образцов в зависимости от регламента упрочняющей обработки

Номер регламента	Режим обработки	Усталостная долговечность образцов N, 10^3
Исходный образец	—	44
1	У (90 мин)	452
2	У (60 мин) + + $T_{пр}$ ($20 \cdot 10^3$ циклов) + + У (30 мин)	547
3	У (30 мин) + + $T_{пр}$ ($20 \cdot 10^3$ циклов) + + У (30 мин) + + $T_{пр}$ ($20 \cdot 10^3$ циклов) + + У (30 мин)	500
4	У (90 мин) + О (3 сут.)	219
5	У (60 мин) + О (18 сут.) + + $T_{пр}$ ($60 \cdot 10^3$ циклов) + + У (30 мин) + О (3 сут.)	204

обусловленный ростом физико-механических характеристик качества поверхностного слоя (без разрушения), достигается при продолжительности обработки t = 90 мин. Дальнейшее увеличение времени обработки, как следует из результатов исследований, не способствует повышению эффективности упрочнения.

Для подтверждения этого, экспериментально подтвержденного факта, была проведена серия экспериментальных исследований по оценке влияния продолжительности виброударного упрочнения на усталостную долговечность образцов, из которых следует, что с повышением степени упрочнения образцов, обусловленной продолжительностью упрочняющей обработки, усталостная долговечность растет до достижения поверхностным слоем предельной степени упрочнения, соответствующей времени упрочняющей обработки 90 мин. При этом показатели усталостной долговечности образцов возросли по сравнению с исходными в 9 раз. Снижение усталостной долговечности образцов, упрочненных свыше 90 мин, обусловлено переупрочнением поверхностного слоя образцов.

Проведенные исследования позволили определить эффективные, с точки зрения повышения усталостной долговечности образцов, условия упрочняющей обработки ППД виброударным методом. Эти условия обработки были взяты за основу при проведении дальнейших экспериментальных исследований по оценке эффективности влияния регламентов упрочнения на повышение усталостной долговечности образцов, результаты которых приведены в таблице.

Сравнительный анализ данных, представленных в таблице, показал:

— применение однократного дополнительного виброударного упрочнения после промежуточного циклического нагружения (тренировки) способствует повышению усталостной долговечности образца примерно в 1,2 раза;

— двукратное дополнительное виброударное упрочнение образцов в сочетании с двукратным промежуточным циклическим нагружением повышает усталостную долговечность образцов в 1,1 раза;

— последеформационный отдых образцов не оказывает существенного влияния на повышение усталостной долговечности, что обуславливается релаксацией напряжений или разупрочнением.

Как видно из результатов исследований, усталостная долговечность образцов, подвергнутых двукратному дополнительному виброударному упрочнению ППД, снизилась по сравнению с усталостной долговечностью образцов, подвергнутых

однократному дополнительному виброударному упрочнению. Для понимания этого явления был проведен графический анализ процессов, протекающих в поверхностном слое образцов при упрочняющей обработке и их циклическом нагружении, основанный на следующих положениях.

При упрочняющей обработке деталей методами ППД, как показано в работе [3], формируется качественно новый поверхностный слой, характеризуемый повышенными физико-механическими характеристиками без концентраторов напряжений и синергетически уравновешенной равномерно измельченной структурой. Реальные материалы изначально содержат определенную концентрацию дефектов и ненулевую начальную энергию E_0, запасенную при технологической обработке материала. Особенно много дефектов в поверхностных слоях образуется при упрочняющей обработке деталей. В соответствии с современными представлениями процесс упрочнения поверхностного слоя (ПС) деталей методами ППД есть кинетический процесс, протекающий во времени. В общем виде энергетическое состояние деформируемого в процессе ППД элемента ПС можно представить так:

$$E = E_0 + E_y,$$

где E_y — рост плотности скрытой энергии различного рода дефектов и повреждений, накапливающихся в материале вследствие ППД.

В соответствии с кинетическими представлениями о процессе ППД максимально упрочненным ПС считается, когда плотность E внутренней энергии в деформируемых элементах, находящихся на поверхности детали, достигнет предельной величины $E_{опт}$. Это состояние ПС для конкретных условий ППД характеризуется наиболее высокими прочностными свойствами, так как твердость и остаточные напряжения обеспечивают максимальное повышение эксплуатационных характеристик детали. Это положение получило подтверждение в ходе экспериментальных исследований, проводимых для установления эффективных условий виброударной обработки, которые показали, что предельная плотность внутренней энергии упрочненного поверхностного слоя $E_{опт}$ образцов, при которой достигается наибольший прирост усталостной долговечности, обеспечивается при продолжительности обработки $t = 90$ мин.

В процессе эксплуатации материалов происходит дополнительная повреждаемость, приводящая к дополнительному приращению внутренней энергии на величину $E_э$. Таким образом, условие разрушения поверхностного слоя в процессе эксплуатации можно представить в виде $E_{кр} = E_0 + E_у + E_э$. При этом особо следует отметить, что представление о процессе повреждаемости и разрушения ПС на этапе ППД и эксплуатации вытекает из двух экспериментально установленных фактов, из которых первый свидетельствует о его статистическом характере, второй раскрывает его феноменологическую сторону. В основе феноменологичности процесса лежит зависимость от силовых параметров нагружения и времени (циклов) их воздействия, из которой следует, что если два процесса протекают как при более высоких внешних силовых параметрах нагружения, так и при более низких, разница в поведении деформируемого элемента ПС будет зависеть только от скорости (степени) повреждаемости. Статистически процесс выглядит следующим образом. В каждый момент времени (цикл) деформирования элемента ПС заданным условиям нагружения соответствует определенная степень его повреждаемости. Как только повреждаемость материала в локальном микрообъеме достигает предельной (критической) величины, начинается процесс его разрушения в виде микро- и макронарушений.

На рис. 5 представлена графическая иллюстрация влияния регламентов 1—3 упрочняющей обработки на усталостную долговечность образцов, построенная из допущения, что процессы упругопластической деформации и повреждаемости при циклическом нагружении образцов протекают по линейной зависимости. Сплошными линиями 0, 1, 2, 3 показано изменение плотности внутренней энергии поверхностного слоя исходного и предельно упрочненных согласно регламентам 1, 2, 3 образцов, в процессе их циклического нагружения до момента разрушения, зафиксированного результатами экспериментальных исследований.

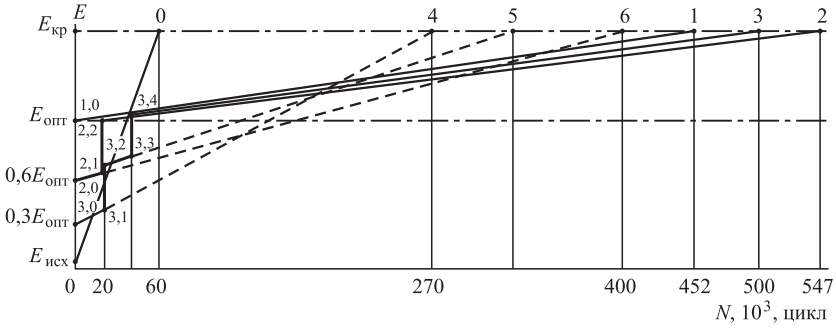


Рис. 5. Графическая интерпретация результатов экспериментальных исследований влияния упрочняющей обработки на усталостную долговечность образцов

Штриховыми линиями 4, 5, 6 определено изменение плотности внутренней энергии поверхностного слоя образцов в процессе промежуточного их циклического нагружения (отрезки 2—0—2—1; 3—0—3—1; 3—2—3—3). Отрезки 0—1—0; 0—2—0; 2—1—2—2; 0—3—0; 3—1—3—2; 3—3—3—4 показывают изменение плотности внутренней энергии поверхностного слоя в процессе виброударного упрочнения ППД в соответствии с регламентами 1, 2, 3.

Выводы

1. Дополнительная упрочняющая обработка обеспечивает повышение усталостной долговечности при условии, что степень упрочнения поверхностного слоя не превышает предельно допустимую величину, свойственную конкретному материалу.

2. Двукратное дополнительное виброударное упрочнение образцов в сочетании с двукратным промежуточным циклическим нагружением обеспечивает повышение усталостной долговечности в том случае, если степень упрочнения поверхностного слоя не превышает критическую величину для конкретного материала.

3. Превышение предельно допустимой степени упрочнения поверхностного слоя приводит к снижению усталостной долговечности в связи с переупрочнением поверхности, что и было допущено при упрочнении образцов по регламенту 3.

4. Для обеспечения повышения усталостной долговечности режимы дополнительной упрочняющей обработки должны быть согласованы с продолжительностью (числом циклов) промежуточного циклового нагружения, которое также сопровождается развитием упругопластической деформации в поверхностном слое и как следствие повышением его напряженного состояния.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д.: ДГТУ, 1999. 620 с.

2. **Технологическое** обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко и др.; под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2006. 447 с.

3. **Лебедев В.А.** Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования. Ростов н/Д.: Издательский центр ДГТУ, 2006. 183 с.

УДК 669.15:620.1:621.78

М.А. Филиппов, Е.И. Корзунова, В.А. Шарапова, В.В. Легчило
(Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург)
E-mail: kaf.mv@mail.ru

Инженерный метод оценки способности металлов и сплавов к деформационному упрочнению

Предложен технически простой метод оценки способности металлов и сплавов к деформационному упрочнению путем определения прироста твердости при измерении твердости по Роквеллу на дне лунки от шарообразного индентора, полученного на приборе Бринелля. На примере экспериментального применения "метода двух твердомеров" показано различие в способности к наклепу двух аустенитных марганцевых сталей. Метод позволяет оценить способность материалов к наклепу без изготовления специальных образцов и использования деформирующего оборудования.

Ключевые слова: *метод оценки способности к наклепу, твердость по Бринеллю и Роквеллу.*

Technically simple method for estimating of the ability of metals and alloys to deformation hardening by determining of the hardness gain in the measurement of Rockwell hardness at the bottom of cup from spherical indenter obtained on Brinell instrument is proposed. Using the example of the experimental application of the "two-hardness testers method", difference in the ability to cold-work hardening two austenitic manganese steels is shown. The method makes it possible to evaluate the ability of materials to cold-work hardening without manufacturing of special samples and the use of deforming equipment.

Keywords: *assessment method of ability to cold-work hardening, Brinell hardness and Rockwell hardness.*

Введение

В процессе механической обработки поверхности деталей машин или эксплуатационного воздействия на поверхность при механических видах изнашивания, тем более при упрочнении поверхностной пластической деформацией, возникает необходимость оценки склонности сталей к наклепу.

Не существует методически простого инженерного критерия оценки способности металла к наклепу, особенно содержащего в структуре метастабильный аустенит, испытывающий в процессе упругопластической деформации мартенситное превращение, в том числе и при вдавливании индентора в процессе измерения твердости. Тем не менее использование стандартных приборов для измерения твердости по методам Бринелля и Роквелла позволяет в первом приближении относительно просто оценить способность металла или сплава к деформационному наклепу.

Цель работы — обсуждение инженерного метода оценки способности стали к деформационному упрочнению на примере износостойких сталей на основе стабильного высокомарганцевого аустенита — 110Г13Л и метастабильной аустенитной хромомарганцевой стали — 60Г9Х4Л, механизмы деформационного упрочнения в которых изучены ранее [1].

Методика проведения эксперимента

Пластины размерами 40×20×5 мм из сталей 110Г13Л (1,25 % C; 12,55 % Mn; 0,2 % Cr; 0,055 % P; 0,03 % S) и 60Г9Х4Л (0,63 % C; 9,45 % Mn; 3,92 % Cr; 0,042 % P; 0,035 % S) после закалки в воду от 1050 °C стали 110Г13Л и от 1120 °C — стали 60Г9Х4Л имели полностью аустенитную структуру (температуры $M_д$ и $M_н$ составляли ⩽196 °C для стали 110Г13Л и −40 °C стали 60Г9Х4Л, температура $M_д$ для этой стали, определенная при растяжении, составила 160 °C). Шлифованную боковую поверхность образцов использовали для нанесения отпечатков на прессе Бринелля шариком диаметром 10 мм при нагрузках 4903, 9807, 19614, 29420 Н (500, 1000, 2000 и 3000 кгс) и при тех же нагрузках шариком диаметром 5 мм.

После этого на приборе Роквелла алмазом при стандартной нагрузке 1471 Н (150 кгс) измеряли твердость в центре дна лунок (отпечатков), образовавшихся от внедрения шарообразных инденторов на прессе Бринелля. Отклонение от центра дна отпечатков составляло ±0,5 мм. На дне каждого отпечатка проводили только одно измерение твердости по Роквеллу[1].

Результаты исследования и их обсуждение

График твердости по Роквеллу на дне отпечатков в зависимости от нагрузки на индентор сталей 110Г13Л и 60Г9Х4Л для шариков диаметром 10 и 5 мм представлен на рис. 1. Кривые для обеих сталей и диаметров шариков имеют возрастающую зависимость от нагрузки подобно кривым упрочнения при пластической деформации сжатием, что указывает на увеличение степени деформации на дне отпечатков по мере увеличения нагрузки на индентор [2, 3].

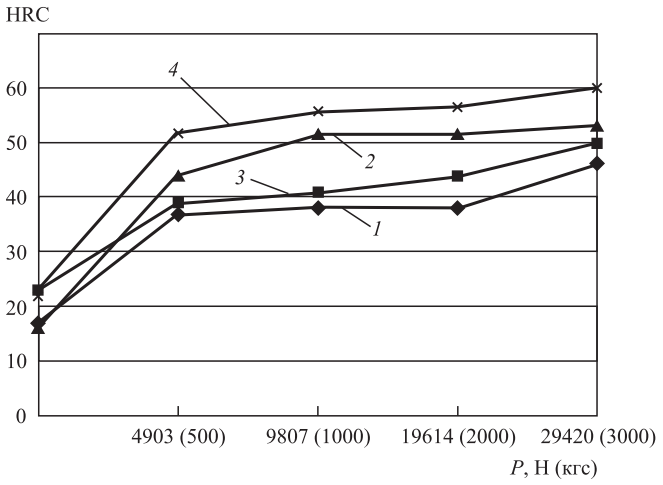


Рис. 1. Зависимость твердости сталей 110Г13Л (*1*, *2*) и 60Г9Х4Л (*3*, *4*) от нагрузки на шарик диаметром 10 мм (*1*, *3*) и 5 мм (*2*, *4*)

Характерно при этом, что отпечатки при всех нагрузках на образцах стали 60Г9Х4Л обнаруживают ферромагнитность при измерении ферритометром, в то время как аналогичные отпечатки на образцах стали 110Г13Л немагнитны. Этот факт однозначно указывает на появление α-мартенсита при вдавливании шарообразных инденторов в поверхность метастабильной аустенитной стали 60Г9Х4Л, в которой превращение идет при нагружении по схеме $\gamma \to \varepsilon \to \alpha$ [1] и на стабильность аустенита стали 110Г13Л в этих условиях воздействия на поверхность.

Обращает на себя внимание, что кривые упрочнения для образцов обеих сталей для шарика диаметром 10 мм располагаются ниже соответствующих кривых для шарика диаметром 5 мм. Это естественно, так как одинаковые по величине нагрузки при действии на шарик меньшего диаметра производят его внедрение на большую глубину и стимулируют большую степень деформации под индентором. Глубина деформированного слоя, как и диаметр отпечатка, прямо пропорциональны приложенной силе *P* и обратно пропорциональны твердости металла [4]. Обе характеристики — диаметр отпечатка и глубина наклепанной зоны, особенно по центру отпечатка, — взаимо-

[1] В разработке метода принимали участие В.И.Шумяков и М.В.Тюмкова.

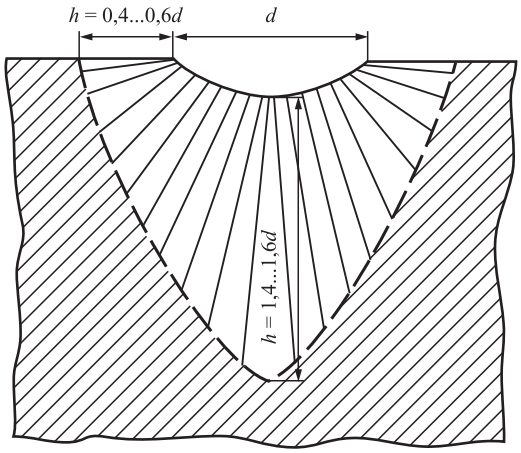


Рис. 2. Характер распространения наклепанной зоны под поверхностью отпечатка [4]

связаны, однако коэффициент пропорциональности между этими величинами изменяется в широких пределах в зависимости от структуры металла [4]. В связи с этим важно измерение твердости по Роквеллу проводить по центру лунки от вдавливания шарика. Для повышения достоверности желательно использовать измерение по методу Роквелла не менее пяти лунок, оставшихся после измерения по методу Бринелля, и из полученных значений твердости выбрать три максимальных, которые произведены по центру лунок.

Под действием нагрузки P шарик вдавливается в поверхность образца, при этом из зоны деформации металл вытесняется наружу. В результате в месте вдавливания образуется шаровая лунка (отпечаток) диаметром d и глубиной h. При статическом вдавливании шарика в плоскую поверхность образца сначала происходит упругая деформация. Глубина упругого вдавливания зависит от нагрузки, с увеличением которой в определенный момент начинается пластическая деформация. Снятие нагрузки после любой деформации сопровождается упругим восстановлением отпечатка, так что

$$h = H - h_у,$$

где H — полная глубина вдавливания; $h_у$ — доля упругой составляющей, снимающейся при снятии нагрузки; h — глубина восстановленного отпечатка (остаточная глубина).

Для установления качественных соотношений между результатами локального упрочнения, моделируемого измерением твердости по Роквеллу дна отпечатка, поставленного на прессе Бринелля при различных нагрузках, описанных выше, и поведения сталей при объемной деформации, в данной работе изучено упрочнение образцов сталей 110Г13Л и 60Г9Х4Л при испытании на сжатие (ГОСТ 25.503—97). Цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 15 мм после закалки испытывали при сжатии на гидравлическом прессе с силой до 50 кН. Степень относительной деформации φ оценивали по уменьшению высоты образцов, твердость и количество мартенситных фаз измеряли методом рентгеноструктурного анализа на торцевой поверхности образцов.

Результаты измерения твердости образцов сталей 110Г13Л и 60Г9Х4Л и количества α-мартенсита в стали 60Г9Х4Л в зависимости от степени пластической деформации при сжатии показаны на рис. 3.

Из сравнения данных по упрочнению в процессе локальной деформации на прессе Бринелля и при объемной деформации сжатием (см. рис. 1 и 3) можно сделать заключение о качественном сходстве этих зависимостей, несмотря на различный характер напряженного состояния и степени деформации образцов. В обоих случаях наблюдается более интенсивный темп нарастания твердости в метастабильной аустенитной стали 60Г9Х4Л по сравнению со стабильной сталью 110Г13Л.

Исходя из существующих представлений об особенностях упрочнения метастабильных аустенитных сталей (МАС), можно сделать вывод, что эффект упрочнения МАС в интервале температур $М_н$—$М_д$ определяется тремя основными факторами:

1) деформационным упрочнением аустенита;

2) количеством, прочностью и распределением образующихся при деформации ε- и α-мартенситных фаз;

3) наклепом кристаллов мартенсита деформации.

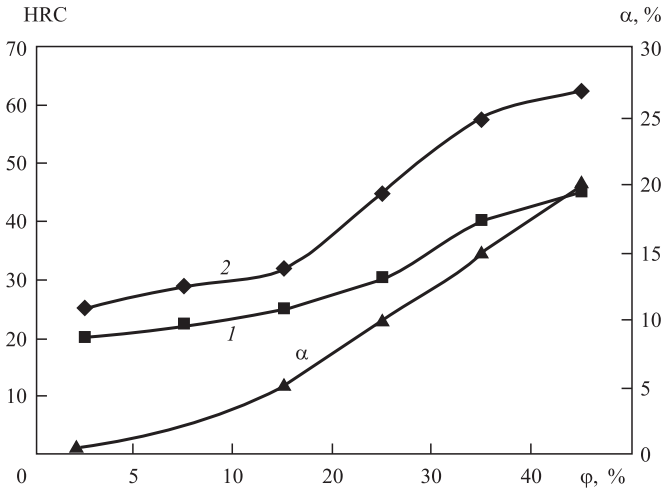


Рис. 3. Твердость образцов сталей 110Г13Л (*1*), 60Г9Х4Л (*2*) и количество α-мартенсита в стали 60Г9Х4Л в зависимости от степени пластической деформации при сжатии

Благодаря тому, что действие двух последних факторов, вносящих существенный вклад в упрочнение, присуще только сталям с метастабильным аустенитом, эти стали обладают более высокой способностью к упрочнению, чем близкие по составу стабильные аустенитные стали [5], если считать другие факторы, вносящие вклад в деформационное упрочнение и релаксацию напряжений (твердорастворное упрочнение, энергия дефектов упаковки, двойникование и т.п.), менее значимыми, чем образование более твердых, чем исходный аустенит, кристаллов мартенсита деформации [6].

Заключение

Наблюдаемое близкое совпадение в оценках более высокой способности к упрочнению образцов МАС 60Г9Х4Л по сравнению со стабильной сталью 110Г13Л, по разнице в твердости при одинаковой нагрузке на индентор и разной твердости при одинаковой степени сжатия дает возможность применять простой "метод двух твердомеров" в инженерной практике оценки склонности сталей к наклепу.

Этот метод можно использовать для оценки склонности к наклепу также чугунов, цветных сплавов и чистых металлов. Ограничением применимости метода служит только начальная твердость сплава — она не должна превышать 450 HB, границы применимости метода Бринелля во избежание остаточной деформации индентора [2].

По форме и размеру образцов метод не накладывает ограничений, за исключением необходимости плоской поверхности достаточной площади у образцов или деталей для нанесения пяти (при близком совпадении достаточно трех) отпечатков на прессе Бринелля.

Таким образом, использование предлагаемого технически простого метода оценки способности стали к деформационному упрочнению путем определения прироста твердости при измерении по методу Роквелла на дне лунки от шарообразного индентора прибора Бринелля позволяет объективно оценить способность металла к наклепу и без изготовления специальных образцов и использования деформирующего оборудования получить требуемые параметры деформационного упрочнения металлов и сплавов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Филиппов М.А., Литвинов В.С., Немировский Ю.Р.** Стали с метастабильным аустенитом. М.: Металлургия, 1988. 257 с.

2. **Золоторевский В.С.** Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1983. 352 с.

3. **Коршунов Л.Г.** Испытания металлов на износостойкость при трении // Металловедение и термическая обработка стали. М.: Металлургия, 1991. Т. 1. С. 387—413.

4. **Упрочнение** и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / под ред. Л.Г. Одинцова. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.

5. **Филиппов М.А., Филиппенков А.А., Плотников Г.Н.** Износостойкие стали для отливок. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2009. 358 с.

6. **Vinogradov A. et al.** Kinetics of deformation processes in high-alloyed cast transformation-induced plasticity steels determined by acoustic emission and scanning electron microscopy influence of austenite stability on deformation mechanisms // Acta Materialia. 2001. Vol. 61. No. 7. P. 2434—2449.

УДК 621.78

В.И. Проскуряков, С.А. Мезенцов, И.В. Родионов
(Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина)
E-mail: prosku.94@mail.ru

Структура и твердость поверхности циркония после лазерной модификации*

Исследовано изменение твердости и структуры поверхности циркония после лазерной модификации на воздухе. Определены зависимости параметров твердости и характера структуры поверхности от режимов лазерной обработки. Установлено повышение твердости поверхностного слоя циркония после лазерной модификации с (2,6 ± 0,1) до (33,88 ± 0,1) ГПа.

Ключевые слова: *цирконий, лазерное упрочнение, структура поверхности, твердость.*

The change in the hardness and structure of the zirconium surface after laser modification in air is studied. The dependences of the hardness parameters and the nature of the surface structure on the laser processing regimes are determined. Increase in the hardness of the surface layer of zirconium after laser modification from (2.6 ± 0.1) to (33.88 ± 0.1) GPa is established.

Keywords: *zirconium, laser hardening, surface structure, hardness.*

Введение

Цирконий и его сплавы благодаря своим физико-химическим свойствам нашли широкое применение в машино- и приборостроении, а также при изготовлении изделий медико-технического назначения. Под действием механических нагрузок пластичность и прочностные характеристики циркониевых изделий снижаются [1] и для их повышения цирконий и его сплавы подвергают термической и химико-термической обработке, газо- и паротермическому оксидированию, лазерному упрочнению [2—5]. Лазерная обработка различных сталей и сплавов, в том числе и циркония, является наиболее простым и эффективным ресурсосберегающим методом формирования высокотвердого защитного слоя на поверхности [3—5]. Данный метод обработки материалов характеризуется определенной универсальностью, т.е. возможностью одновременно проводить термическую и структурообразующую модификационную обработку поверхности. Кроме того, существует технологическая возможность обработки какого-либо определенного выбранного участка поверхности. В некоторых случаях лазерная обработка позволяет сократить, а иногда и вовсе исключить ряд предварительных операций подготовки изделий, таких как шлифование, полировка, очистка от технологических загрязнений. В процессе упрочнения происходит существенное изменение структуры приповерхностного слоя металла и, следовательно, физико-механических свойств — твердости и модуля упругости [6].

Цель работы — определение зависимости структуры и твердости поверхности циркония от режимов импульсного лазерного воздействия.

Методика эксперимента

Обработку циркониевых образцов проводили при помощи автоматизированной установки для термофизической когерентной модификации поверхности LRS-50A. Исследуемые образцы представляли собой пластины циркония марки Е110, размерами 10×10×3 мм. Лазерное воздействие осуществлялось при напряжении 350, 375, 400, 425,

* Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания образовательным организациям высшего образования, подведомственным Минобрнауки РФ (проект 11.1943.2017/4.6).

450 и 475 В. Длительность τ импульсного воздействия составляла 0,7; 0,85 и 1 мс. Луч фокусировался в пятно диаметром 1 мм. Сканирование поверхности осуществлялось при частоте следования импульсов излучения 15 Гц и коэффициенте перекрытия 0,1. Структуру поверхности исследовали методом оптической микроскопии с использованием компьютерной программы графической обработки микроизображений Metallograph. При этом анализировали участки поверхности площадью 5 мм^2. Микротвердость измеряли твердомером ПМТ-3М с индентором Виккерса при нагрузке на индентор 1,961 Н (ISO 6507-1:2005). Статистическую обработку результатов исследования проводили с использованием программы DataFit 9.

Результаты исследований и их анализ

Согласно проведенному микроскопическому анализу, поверхность циркониевых образцов в результате импульсного лазерного воздействия приобретает равномерно распределенную структуру при повышенных значениях напряжения $U = 475$ В и длительности 0,75 мс (рис. 1, *б*). При длительности импульсного воздействия 1 мс и напряжении $U = 475$ В наблюдаются возникновение неоднородности структуры и сильное оплавление металла в зоне лазерного воздействия (рис. 1, *д*).

При малом напряжении $U = 350$ В и длительности τ = 0,75 мс поверхность образца была однородной с равномерно распределенными элементами структуры. На подготовленных шлифах не было обнаружено микротрещин и других поверхностно-структурных дефектов.

При исследовании других режимов обработки визуализируется образование микротрещин, рост которых происходит с увеличением напряжения. На рис. 2 показано изменение структуры поверхности циркония после лазерной модификации. Выявлено, что с увеличением напряжения и длительности импульсного воздействия усиливается рост микротрещин вглубь металла. Так, например, при напряжении 475 В и длительности 1 мс размер трещин достигает порядка 180 мкм.

Результаты измерения твердости показали, что в процессе лазерного импульсного воздействия твердость циркониевых образцов значительно увеличивается (табл. 1). Максимальное значение H = (33,88 ± 0,1) ГПа было получено при напря-

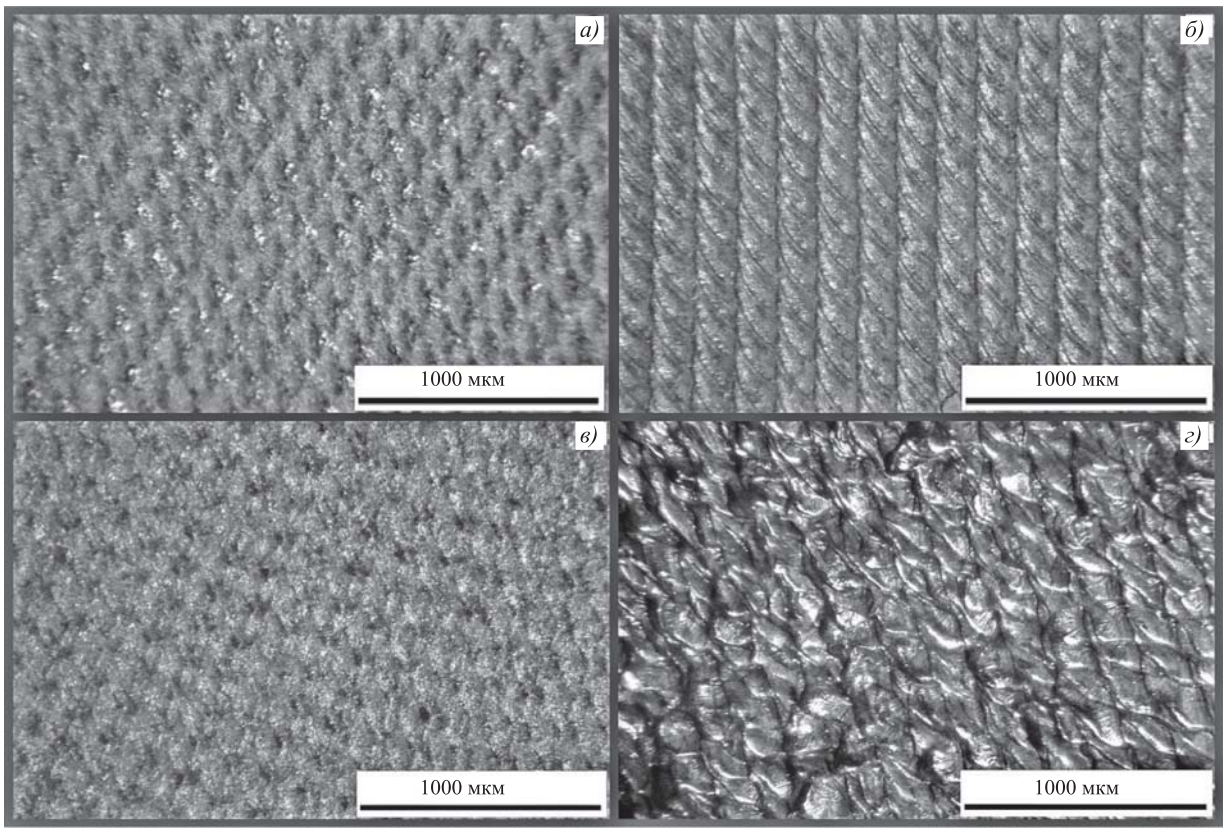


Рис. 1. Морфология поверхности циркония Е110 после импульсного лазерного воздействия при длительности τ = 0,75 мс с $U = 350$ В (*а*) и $U = 475$ В (*б*); при длительности τ = 1 мс с $U = 350$ В (*в*) и $U = 475$ В (*д*)

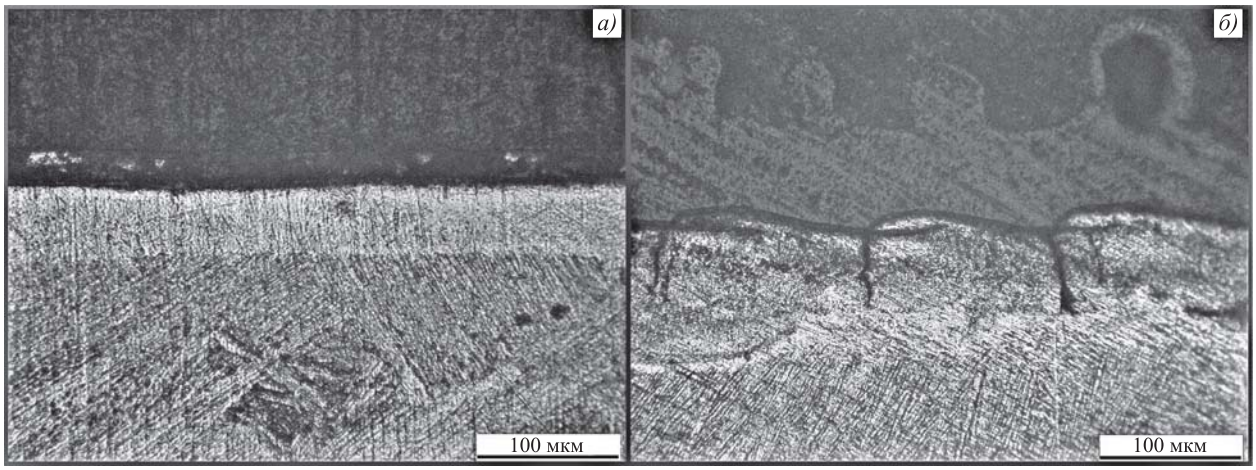


Рис. 2. Микрошлифы циркониевых образцов после лазерной модификации:
а — τ = 0,75 мс и *U* = 370 В; *б* — τ = 1 мс и *U* = 450 В

жении 450 В и длительности импульсного воздействия 1 мс. При этом значение твердости исходного образца циркония составляло (2,6 ± 0,1) ГПа.

По полученным результатам была построена эмпирическая модель зависимости твердости поверхности циркония от режимов лазерного модифицирования (рис. 3, см. обложку).

Таблица 1

Результаты среднестатистических значений твердости поверхности образцов циркония, полученных в результате лазерного упрочнения при различных режимах

τ, мс	*U*, В	Н, ГПа
0,70	350	24,49 ± 0,1
	375	19,90 ± 0,1
	400	27,03 ± 0,1
	425	26,85 ± 0,1
	450	22,73 ± 0,1
	475	21,77 ± 0,1
0,85	350	13,67 ± 0,1
	375	17,65 ± 0,1
	400	16,90 ± 0,1
	425	18,60 ± 0,1
	450	26,53 ± 0,1
	475	26,16 ± 0,1
1,00	350	17,62 ± 0,1
	375	18,41 ± 0,1
	400	19,70 ± 0,1
	425	25,50 ± 0,1
	450	33,88 ± 0,1
	475	23,26 ± 0,1

На данной модели можно увидеть, что твердость достигает максимального значения при напряжении 420...450 В и длительности импульса 0,95...1,0 мс, а минимальное значение она принимает при напряжении 350 В и длительности импульса порядка 0,8...1 мс.

Построенная эмпирическая модель описывается регрессионным уравнением

$$\text{Н} = -82,6473 + 0,689x_1 - 86,244/x_2 - \\ - 4,054x_1^2 + 77,44/x_2^2 - 0,2427x_1/x_2,$$

где x_1 — напряжение *U*; x_2 — длительность импульсного воздействия τ.

Одной из важных характеристик функциональной поверхности является суммарная пористость *P*. По результатам соответствующей программной обработки (табл. 2) была построена эмпирическая модель зависимости открытой пористости от напряжения и длительности импульсного воздействия (рис. 4, см. обложку). Максимальная величина суммарной открытой пористости составляет 68 % при длительности 0,95...1,0 мс и напряжении 440 В, а минимальная — 43 % при длительности импульса 0,7 мс и напряжении 350 В.

Построенная эмпирическая модель описывается регрессионным уравнением

$$P = 282064,53 - 3459,979x_1 + 16,91x_1 + 0,041x_1^3 + \\ + 4,999x_1^4 - 2,417x_1^5 - 107,407x_2 + 81,48x_2^2.$$

Согласно проведенному гранулометрическому анализу установлено, что при увеличении длитель-

Таблица 2

Результаты гранулометрического анализа поверхности образцов циркония после лазерного упрочнения

Режимы лазерного упрочнения		Характеристики поверхности покрытий						
		Частицы			Поры			
τ, мс	*U*, В	Количество, шт.	Среднее значение, мкм	Дисперсия, мкм^2	Количество, шт.	Среднее значение, мкм	Дисперсия, мкм^2	Суммарная пористость *P*, %
0,70	350	242	7,94	30,51	395	15,65	27,03	43
	375	482	9,46	24,29	364	13,50	29,45	48
	400	331	10,04	27,49	425	13,22	27,34	48
	425	882	9,65	20,79	447	6,54	23,64	54
	450	909	8,75	27,40	546	8,61	30,25	53
	475	695	11,71	36,43	465	8,14	33,84	51
0,85	350	797	8,02	21,87	390	8,48	29,49	51
	375	1029	8,95	13,83	524	5,14	20,46	53
	400	1146	8,73	15,14	445	5,36	22,28	56
	425	835	10,95	27,91	443	5,83	23,09	51
	450	987	8,78	19,14	494	6,09	23,64	53
	475	692	12,97	20,13	506	4,78	20,53	50
1,00	350	800	7,56	18,45	706	7,45	21,08	49
	375	847	9,74	30,38	379	7,62	32,00	59
	400	310	22,73	23,06	356	13,51	39,80	68
	425	723	11,40	15,76	417	4,57	22,39	58
	450	578	11,95	21,45	468	4,86	21,20	57
	475	736	10,84	14,67	547	5,43	19,69	62

ности импульсного воздействия от 0,7 до 1,0 мс средний размер пор уменьшается приблизительно в 2 раза (см. табл. 2). Размер зерен изменяется несущественно, находясь в пределах 8...10 мкм.

Заключение

Установлено, что при режимах импульсного лазерного воздействия $U = 450$ В, $\tau = 1$ мс на поверхности циркония формируется высокотвердый слой, характеризуемый равномерным рельефом. Лазерная модификация поверхности циркония по результатам измерения твердости, а также по результатам гранулометрического анализа, приводит к возрастанию твердости с (2,6 ± 0,1) до (33,88 ± 0,1) ГПа. Таким образом, рекомендованы рациональные технологические режимы для формирования высокотвердой гомогенной структуры поверхности циркония марки Е110.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Chai L., Chen B., Wang S. et al.** Microstructural characteristics of a commercially pure Zr treated by pulsed laser at different powers // Materials Characterization. 2015. Vol. 110. P. 25—32.
2. **Koshuro V., Fomina M., Voyko A. et al.** Structural and phase transformations on zirconium surface after heat treatment with high-frequency currents // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2017. Vol. 917. No. 3. P. 032009.
3. **Koshuro V., Fomina M., Voyko A. et al.** Surface morphology of zirconium after treatment with high-frequency currents // Composite Structures. 2018. Vol. 202. P. 210—215.
4. **Jelani M., Bashir S., Akram M. et al.** Mechanical behaviour of excimer laser irradiated polycrystalline zirconium // Physica Scripta. 2014. Vol. 89. No. 2. P. 025703.
5. **Zhu Y., Fu J., Zheng C., Ji Z.** Effect of nanosecond pulse laser ablation on the surface morphology of Zr-based metallic glass // Optics & Laser Technology. 2016. Vol. 83. P. 21—27.
6. **Saeidi K., Gao X., Zhong Y., Shen Z.J.** Hardened austenite steel with columnar sub-grain structure formed by laser melting //Materials Science and Engineering: A. 2015. Vol. 625. P. 221—229.

УДК 621.658.012.531

С.С. Самотугин, О.А. Христенко
(Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь)
khrystenko.olga@gmail.com

Анализ технологической системы, процесс резьбонарезания инструментом, прошедшим плазменное модифицирование

Изложены принципы системного подхода к оптимизации комплексной технологии (модифицирование инструмента + резьбонарезание), которые позволяют, в зависимости от поставленной задачи, выбирать оптимальные параметры плазменной обработки для конкретного типа резьбонарезного инструмента и конкретных условий резьбонарезания.

Ключевые слова: *технологическая система, плазма, резьбонарезание, модифицирование.*

The principles of the system approach for optimization of the complex technology (tool modification + threading) which allow, depending on the task, to select the optimal plasma processing parameters for particular type of threading tool and the specific conditions for threading are described.

Keywords: *technological system, plasma, threading, modification.*

Для повышения работоспособности металлорежущего инструмента в последнее время все более широкое распространение получают методы поверхностного модифицирования с использованием высококонцентрированных источников энергии, в частности плазменной струи [1]. При этом одним из наиболее сложных и наименее изученных объектов для применения таких технологий является резьбонарезной инструмент [2]. Резьба — это сложная винтовая поверхность, к которой предъявляются высокие требования по точности и чистоте обработки. Вследствие сложности процесса формообразования резьбы резьбонарезной инструмент работает в очень трудных условиях [3, 4].

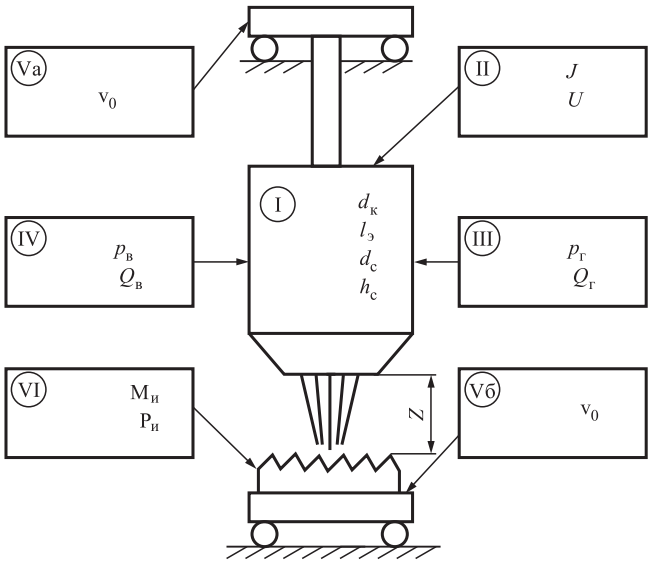


Рис. 1. Схема плазменного технологического комплекса: I — плазмотрон; II — блок энергопитания; III — блок подачи плазмообразующего газа; IV — блок охлаждения плазмотрона; Va — блок перемещения плазмотрона; Vб — блок перемещения инструмента; VI — обрабатываемый инструмент; *Z* — дистанция обработки

Для практической реализации процесса плазменного модифицирования инструмента используется плазменный технологический комплекс [1], схема которого показана на рис. 1. Комплекс включает в себя шесть относительно самостоятельных блоков, каждый из которых позволяет задавать определенные регулируемые параметры режима плазменной обработки.

В зависимости от технического исполнения или технологических особенностей обработки в технологическом комплексе может быть задействован либо блок перемещения плазмотрона Va, либо блок перемещения инструмента Vб. В обоих случаях регулируемый параметр режима — скорость обработки. Кроме того, самостоятельным регулируемым параметром, не связанным ни с одним из блоков, является дистанция обработки — расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности. Перечень и обозначение всех регулируемых параметров режима плазменного модифицирования инструмента с использованием специально разработанного плазмотрона [5] сведены в табл. 1.

При разработке интегрированных технологий поверхностного модифицирования, встраиваемых в действующие технологические процессы

изготовления инструмента, задача оптимизации приведенных в табл. 1 параметров может быть решена только в случае системного подхода и рассмотрения процесса плазменной обработки как технологической системы [6]. В свою очередь наиболее высокие стойкостные показатели модифицированного инструмента и экономические показатели новой технологии могут быть достигнуты только на основе комплексного совместного анализа процесса плазменной обработки и условий резания модифицированным инструментом.

Учитывая многообразие условий эксплуатации резьбонарезного инструмента и возможных технологических вариантов плазменной обработки (по аналогии с лазерной [7]), для реализации такого подхода целесообразно рассматривать процесс резьбонарезания инструментом с модифицированным слоем как единую технологическую систему. Структурная схема такой технологической системы приведена на рис. 2.

В технологическую систему *T* в качестве составляющих входят две подсистемы — технологическая операция плазменного модифицирования (*M*) и технологическая операция резьбонарезания (*P*). Структурные схемы указанных подсистем, составленных с учетом рекомендаций [6, 8], опыта создания таких систем для лазерной [7] и плазменной [9] обработки, приведены на рис. 3.

Таблица 1

Регулируемые параметры режима плазменного модифицирования металлорежущего инструмента

Блок	Параметр режима	Обозначения
I. Плазмотрон	Диаметр внутреннего дугового канала	$d_к$
	Межэлектродное расстояние	$l_э$
	Диаметр отверстия сопла	$d_с$
	Высота отверстия сопла	$h_с$
II. Энергопитание плазменной струи	Сила тока плазменной струи	J
	Напряжение плазменной струи	U
III. Подача плазмообразующего газа	Давление газа	$p_г$
	Расход газа	$Q_г$
IV. Охлаждение плазмотрона	Давление охлаждающей воды	$p_в$
	Расход охлаждающей воды	$Q_в$
V. Перемещение плазмотрона (инструмента)	Скорость обработки	v_0
VI. Обрабатываемый инструмент	Марка инструментального материала	$М_и$
	Размеры обрабатываемой поверхности	$Р_и$
—	Дистанция обработки	Z

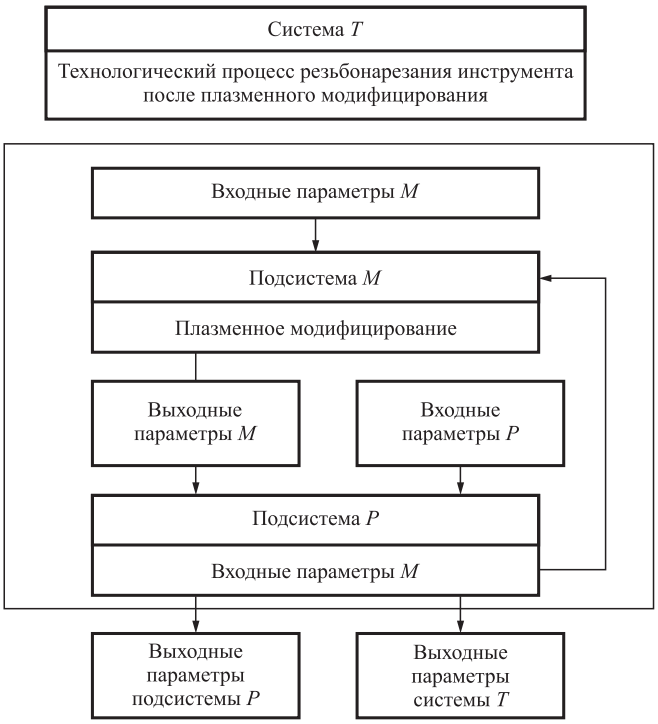


Рис. 2. Структурная схема технологической системы "Технологический процесс резьбонарезания инструментом, прошедшим плазменное модифицирование"

Входными параметрами в подсистеме *M* (см. рис. 3, *а*) являются регулируемые параметры плазменного технологического комплекса (см. табл. 1), а выходными параметрами — твердость и толщина модифицированного слоя, а также его теплостойкость (для инструмента из быстрорежущих сталей). Входными параметрами в подсистеме *P* (см. рис. 3, *б*) являются параметры обрабатываемой детали (марка материала $М_д$, размер $Р_д$), параметры режима резания (скорость резания v, подача *S* и толщина срезаемого слоя *t*) и параметры, связанные с методом обработки и применяемым оборудованием (станок — приспособление — инструмент — среда). Кроме того, входными параметрами в подсистеме *P* являются также выходные параметры подсистемы *M* (см. рис. 2). Выходные параметры подсистемы *P* — это технико-экономические показатели, характеризующие процесс резьбонарезания инструментом, прошедшим плазменное модифицирование (см. рис. 3, *б*). Эти же параметры являются и выходными параметрами системы *T*.

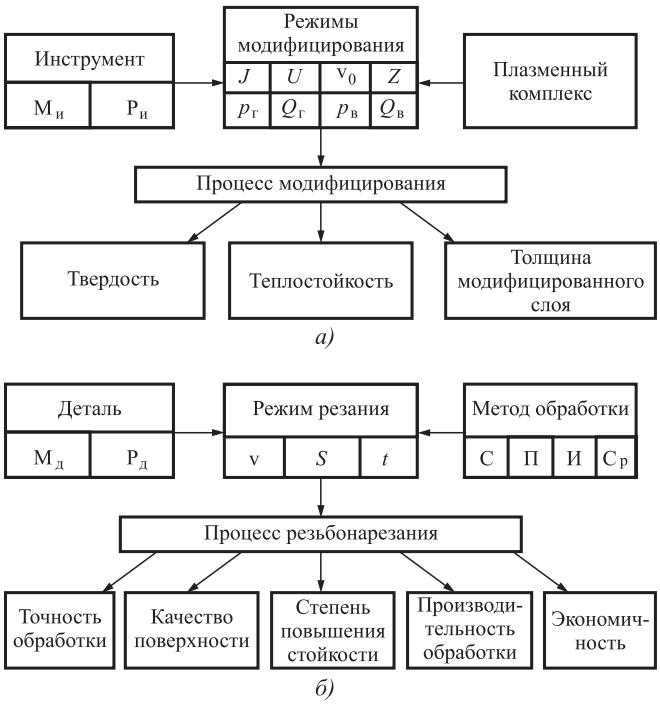


Рис. 3. Структурные схемы технологических подсистем: *а* — плазменного модифицирования *M*; *б* — резьбонарезания *P*

Другую группу выходных параметров системы *T* (см. рис. 2) представляют технико-экономические показатели комплексной технологии (модифицирование инструмента + резьбонарезание), позволяющие выполнять оценку эффективности использования данного метода упрочнения в сравнении с другими, например, лазерной обработки в сравнении с плазменной, плазменной обработки в сравнении с нанесением покрытий и т.п.

Изложенные выше принципы системного подхода к оптимизации комплексной технологии (модифицирование инструмента + резьбонарезание) позволяют, в зависимости от поставленной задачи, выбирать оптимальные параметры плазменной обработки для конкретного типа резьбонарезного инструмента и конкретных условий резьбонарезания или, с другой стороны, выбирать оптимальные параметры процесса резьбонарезания (например, режим резания) для конкретного типа инструмента после плазменного модифицирования.

В качестве примера практического использования разработанного системного подхода можно рассмотреть особенности выбора оптимальных режимов резания резьбонарезными профильными резцами с напаянными твердосплавными пластинами, прошедшими плазменное модифицирование. Как установлено ранее [10], при плазменной обработке на оптимальных режимах резцов с пластинами из сплавов типа ВК и ТК по передней поверхности образуется модифицированная зона с субмикрокристаллической структурой и более высокой, по сравнению с исходной, твердостью. Наличие на режущей части резца модифицированной зоны шириной до 10 мм и глубиной до 3 мм позволяет реализовать одно из главных технико-экономических преимуществ поверхностного модифицирования по сравнению с нанесением покрытий из нитридов или карбидов — возможность выполнения нескольких переточек (иногда до 10) с сохранением модифицированной зоны и без необходимости повторного упрочнения (рис. 4, *а*).

Температура нагрева при плазменной обработке в объеме модифицированной зоны распределяется неравномерно, что приводит к получению различных значений твердости. Наиболее высокие температура и твердость достигаются в объемах, прилегающих к режущей кромке. На рис. 4, *б* показан характер изменения твердости на передней поверхности резца в модифицированной зоне в зависимости от расстояния до режущей кромки вдоль центральной оси *X*.

Согласно [3], если восстановление режущих свойств инструмента происходит посредством

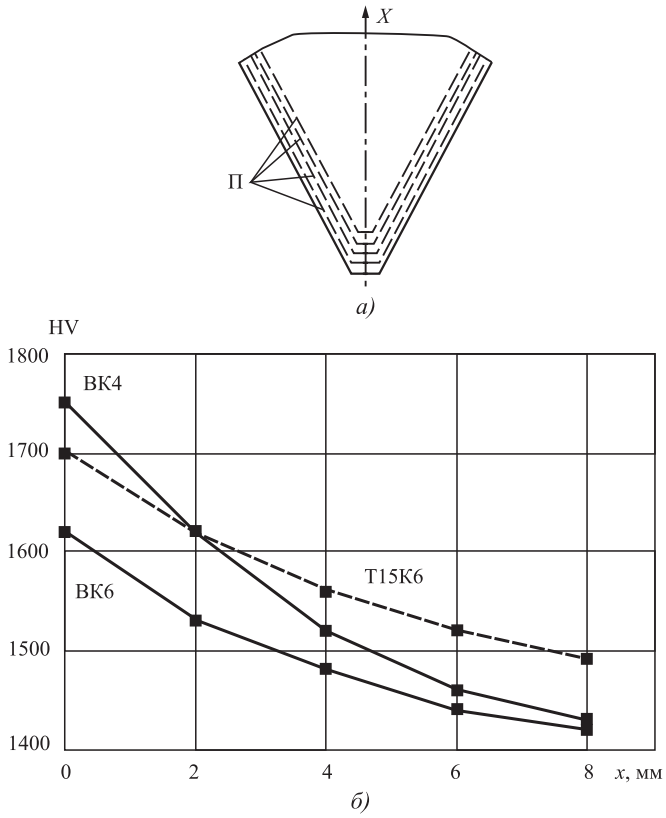


Рис. 4. Схема выполнения переточек профильного резьбового резца (*а*) и характер изменения твердости на передней поверхности (*б*); П — переточки

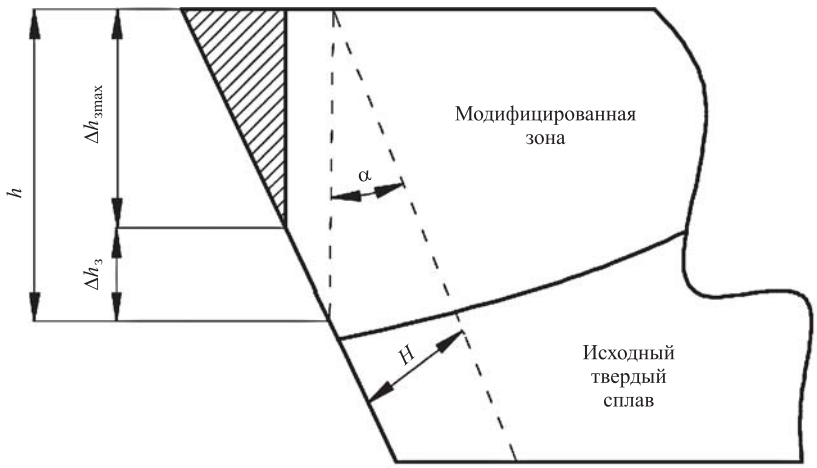


Рис. 5. Схема определения нормы износа профильных резцов с модифицированной зоной [3]

повторных переточек, то нормой износа инструмента является нормированная толщина стачиваемого слоя H, рассчитанная исходя из требования полного удаления следов износа $h_{з\,max}$, а также дополнительного слоя $\Delta h_з$, в пределах которого возможно снижение механических свойств вследствие нагрева до высоких температур в процессе резания — $\Delta h_з$ = 0,1...0,2 мм. Тогда (рис. 5):

$$H = (h_{з\,max} + \Delta h_з)\sin\alpha. \quad (1)$$

Установив величину H по нормативным требованиям $h_{з\,max}$ для заданного типа твердого сплава, условий и режима резания, и зная характер изменения твердости модифицированной зоны (см. рис. 4, *б*), можно прогнозировать как твердость режущей кромки, так и, в зависимости от нее, стойкость резцов с модифицированной зоной после переточек.

Опыт промышленного применения резьбонарезных твердосплавных резцов с модифицированной зоной показывает возможность значительного повышения скорости резания по сравнению с исходными резцами. Становится актуальным вопрос назначения экономически обоснованных режимов резания.

Согласно общепринятым положениям [3] и с учетом рекомендаций [11, 12], для наружного продольного нарезания резьбы профильными твердосплавными резцами скорость резания рассчитывается по уравнению

$$v = \frac{C_V K_V}{T_э P S} K_п, \quad (2)$$

где C_V — коэффициент, учитывающий условия обработки; K_V — общий поправочный коэффициент, учитывающий изменения марки обрабатываемого и инструментального материалов, а также состояние поверхностного слоя заготовки; $T_э$ — экономическая стойкость профильного резца [5], мин; P — шаг резьбы, мм; S — окружная подача заготовки, мм/зуб; $K_п$ — дополнительный поправочный коэффициент на марку твердого сплава и твердость режущей кромки после переточки.

При определении дополнительного поправочного коэффициента $K_п$, связанного с наличием на режущей части резца модифицированной зоны, учитывали характер изменения твердости на передней поверхности резца в модифицированной зоне в зависимости от расстояния до режущей кромки (см. рис. 4, *б*). Расчеты коэффициента $K_п$ проводили по данным справочников [13, 14] и рекомендаций [15] (табл. 2).

Таблица 2

Поправочные коэффициенты для резьбонарезных твердосплавных резцов с модифицированным слоем

Марка твердого сплава	Обрабатываемый материал	Твердость режущей кромки, HV	Среднее значение $K_п$
ВК8	Сталь 20	1600	1,75
		1500	1,60
		1400	1,57
		1300	1,41
	Сталь 40Х	1600	1,32
		1500	1,30
		1400	1,21
		1300	1,18
Т5К10	Сталь 20	1700	2,11
		1600	1,86
		1500	1,63
		1400	1,41
	Сталь 40Х	1700	1,81
		1600	1,69
		1500	1,60
		1400	1,44

Исследования и расчеты показали, что использование твердосплавных профильных резцов после плазменного поверхностного модифицирования на операциях нарезания резьбы на стальных заготовках позволяет значительно (до двух раз) повысить скорость резания и, соответственно, производительность обработки. При этом размеры модифицированной зоны обеспечивают выполнение нескольких (до 10) переточек без повторного упрочнения. При назначении скорости резания резцами после переточек следует учитывать изменение твердости режущей кромки, связанное с неравномерным нагревом резца при плазменной обработке.

Выводы

1. Для повышения эффективности процессов резьбонарезания инструментом, прошедшим плазменное модифицирование, использован комплексный подход на основе рассмотрения единой технологической системы, в которую в качестве взаимосвязанных составляющих входят подсистемы "Плазменное модифицирование" и "Резьбонарезание".

2. Разработанные принципы системного подхода позволяют, в зависимости от поставленной задачи, выбирать оптимальные параметры плазменной обработки для конкретного типа резьбонарезного инструмента и конкретных условий резьбонарезания или выбирать оптимальные параметры процесса резьбонарезания (например, режим резания) для конкретного типа инструмента после плазменного модифицирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Самотугин С.С., Лещинский Л.К.** Плазменное упрочнение инструментальных материалов. Донецк: Новый мир, 2003. 338 с.

2. **Самотугин С.С., Христенко О.А.** Технологические основы плазменного поверхностного модифицирования резьбонарезного инструмента // Наука та виробництво: зб. наук. пр. Маріуполь, 2016. Вип. 1. С. 62—66.

3. **Грановский Г.И., Грановский В.Г.** Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.

4. **Иноземцев Г.Г.** Проектирование металлорежущих инструментов. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.

5. **Самотугин С.С., Пирч И.И., Мазур В.А.** Оптимизация конструкции плазмотрона для поверхностного упрочнения материалов // Сварочное производство. 2002. № 12. С. 32—35.

6. **Вивденко Ю.Н.** Технологические системы производства деталей наукоемкой техники. М.: Машиностроение, 2006. 559 с.

7. **Яресько С.И., Нерубай М.С.** Физико-технологические особенности процесса резания инструментом, упрочненным лазерным излучением // Металлообработка. 2000. № 1. С. 41—47.

8. **Трембач Е.Н., Мелентьев Г.А., Схартладзе А.Г. и др.** Резание металлов. Старый Оскол: ТНТ, 2005. 512 с.

9. **Самотугин С.С., Гагарин В.А., Самотугина Ю.С.** Технологические системы плазменного градиентного упрочнения деталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 9. С. 15—19.

10. **Самотугин С.С., Христенко О.А., Иванов В.И., Кулинский А.С.** Структура и свойства модифицированной зоны обработки резьбонарезных резцов с пластинами с твердых сплавов // Вестник приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2018. Вип. 36. С. 128—131.

11. **Нозирзода Ш.С.** Особенности расчета режимов резания для инструмента с износостойкими покрытиями // Master`s journal. 2016. № 2. С. 40—43.

12. **Петрушин С.И.** Экономически обоснованный срок службы режущих инструментов // Вестник машиностроения. 2007. № 4. С. 40—46.

13. **Машиностроение:** энциклопедический справочник. Т. 1. Кн. 2. Инженерные расчеты в машиностроении. М.: Машгиз, 1948. 457 с.

14. **Справочник** технолога-машиностроителя: в 2 т. / под. ред. А.М. Дальского. М.: Машиностроение, 2001. Т. 2. 944 с.

УДК 621.9.648.4

И.Х. Хасан, Н.Е. Фомин
(Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва, г. Саранск)
E-mail: srorismael@gmail.com

Исследование физико-механических свойств алюминиевого сплава после электроискровой обработки

Представлены результаты исследований физико-механических свойств поверхностей образцов из алюминиевого сплава АК5М7, обработанных электроискровым методом медным электродом на разных режимах. Установлено увеличение микротвердости поверхности исследуемого сплава после электроискровой обработки, что может быть обусловлено повышением дефектности структуры поверхности и появлением в ней новой фазы — Al_2Cu.

Ключевые слова: *алюминиевые сплавы, электроискровая обработка, покрытие, фаза и область когерентного рассеяния.*

The results of studies of the physicomechanical properties of the samples surfaces made of aluminum alloy (AK5M7), treated by the electric-spark method with copper electrode in different modes, are presented. Increase in the microhardness on the surface of the studied alloy after the electric-spark alloying (ESA) is established, which may be due to increase in the imperfection of the surface structure after the ESA and the appearance of new Al_2Cu phase in it.

Keywords: *aluminum alloys, electric spark alloying, coating, phase and coherent-scattering region.*

Введение

Проблема повышения эксплуатационных свойств (износо-, жаро- и коррозионной стойкости) деталей машин, инструментов, приборов методами поверхностного легирования и упрочнения приобретает все большую актуальность. Для увеличения износостойкости деталей обычно используют различные покрытия и методы модификации поверхности. Одним из таких методов является электроискровая обработка (ЭИО) токопроводящих материалов, созданная Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко [1—3]. Использование ЭИО приводит к существенным изменениям физико-механических свойств поверхности обрабатываемых сплавов, в том числе вследствие изменения фазового и структурного составов материалов вновь полученной поверхности. К числу таких металлических материалов относятся и алюминиевые сплавы. Часто расширение применения алюминиевых сплавов сдерживается низкой износостойкостью изготовленных из них рабочих поверхностей деталей машин, что не позволяет обеспечить требуемую долговечность. Для повышения долговечности деталей из алюминиевых сплавов их поверхность может быть обработана методом ЭИО [1]. Вместе с тем многие вопросы поверхностного упрочнения с физической точки зрения остаются не до конца понятными.

Цель работы — исследование взаимосвязи между некоторыми физико-механическими и прочностными свойствами полученной после ЭИО поверхности сплава АК5М7 медным электродом (99,9 %).

В данной работе приведены результаты исследования микротвердости, микродеформации фазового состава и области когерентного рассеяния (ОКР) поверхности сплава АК5М7 после ЭИО. Сплав АК5М7 широко применяется во многих областях машиностроения, в частности из него изготавливают детали подшипника шестеренного насоса НШ-50.

Методика проведения экспериментов

Для проведения исследований были изготовлены образцы размерами 15×15×4 мм из алюминиевого сплава АК5М7 массой около 2 г, поверхности которых обрабатывали методом ЭИО медным электродом. Изменение массы образцов до и после обработки определяли при помощи электронных весов Stratorius BP1S с точностью до 0,0001 г; элементный состав сплава и электрода — методом рентгенофлуоресцентного анализа на приборе ARL Perform'X 4200 (табл. 1).

Электроискровую обработку осуществляли на установке ALIER-31 (фирма SCINTI, Молдова). Используемая установка позволяет проводить ЭИО в широком диапазоне энергий.

Таблица 1

Элементный состав сплава и электрода, %

Материал	Al	Si	Cu
Сплав АК5М7	88	5	7
Электрод	0,1	—	99,9

Рентгенофазовый анализ применяли для определения фазового состава покрытия, нанесенного методом ЭИО на алюминиевый сплав. Съемку образцов проводили на рентгеновском дифрактометре (PANalytical EMPYREAN) на CuK_{α}-излучении с никелевым фильтром с автоматической щелью расходимости первичного пучка. Расшифровку рентгенограмм осуществляли с помощью программы High Score Plus. Изучено количественное содержание фаз, обнаруженных на поверхности, средний размер областей ОКР, величины микродеформаций после ЭИО образцов.

Микротвердость модифицированного слоя измеряли с использованием исследовательского комплекса на базе микротвердомера HVS-1000 и цифровой видеокамеры. Измерения проводили в соответствии с ГОСТ 9450—76 с индентором в виде пирамиды Виккерса с нагрузкой $P = 0{,}245$ Н (25 гс). Каждый образец измеряли не менее семи раз.

Полученные результаты представлены на рис. 1—4 и в табл. 2.

На рис. 1 представлены зависимости потери массы образцов из алюминиевого сплава в зависимости от энергии искрового разряда. Видно, что с повышением энергии ЭИО возрастает потеря массы. Подобный ход кривой может быть обусловлен тем, что как известно [4], с увеличением приложенной энергии повышается и температура процессов при ЭИО материалов. При этом если температура плавления материала подложки ниже температуры плавления используемого электрода, то часть материала подложки будет испаряться, что и приводит к потере массы подложки. С другой стороны, за счет плавления материала анода на поверхность подложки осаждается часть материала анода, что приводит к увеличению массы подложки. В связи с этим полученные результаты могут свидетельствовать о том, что с повышением энергии ЭИО и, соответственно, увеличением температуры процесса испарение материала подложки превалирует над осаждением материала электрода, что и приводит в целом к потере массы подложки.

Таким образом, можно заключить, что во всех случаях применения электродов, температура плавления которых выше температуры плавления подложки, можно ожидать потерю массы подложки, причем с увеличением энергии ЭИО величина потери массы растет.

В табл. 2 приведены концентрации фаз, обнаруженных на поверхности подложки после ЭИО при различной энергии излучения. Видно, что на поверхности образца присутствуют три фазы: фаза на основе алюминия, интерметаллид Al_2Cu и чистый кремний Si. С повышением энергии ЭИО доля алюминиевой фазы уменьшается, доля интерметаллида увеличивается, а доля Si не изменяется. Образование фазы Al_2Cu при взаимодействии материалов электрода (Cu) и подложки из алюминиевого сплава было ранее обнаружено также в работе [5].

На рис. 2 показаны зависимости ОКР фаз на основе Al и Al_2Cu, образовавшихся на поверхности образца после ЭИО, от энергии. Видно, что с

Таблица 2

Концентрация, %, фаз подложки при различных энергиях

Энергия, Дж	Al	Al_2Cu	Si
0,07	97	2	1
0,20	96	3	1
0,39	94	5	1
0,79	89	10	1

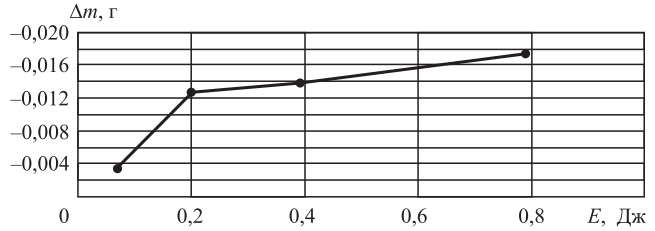


Рис. 1. Зависимость изменения массы от энергии ЭИО

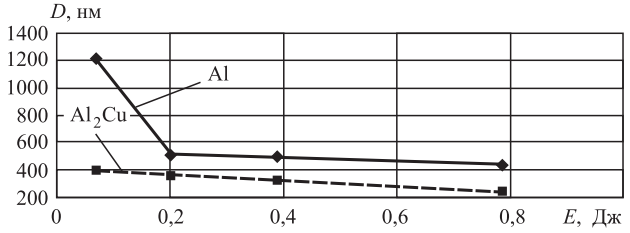


Рис. 2. Зависимость изменения размеров ОКР от энергии

увеличением энергии размер ОКР от обеих фаз уменьшается, при этом величина ОКР фазы на основе Al уменьшается значительно больше, чем ОКР фазы Al_2Cu, а относительное уменьшение ОКР обеих фаз примерно одинаково.

Области когерентного рассеяния представляют собой практически бездефектные участки материала, т.е. это области поверхности, структура которых наиболее совершенна и содержит меньшее количество различного вида дефектов. Следовательно, увеличение размеров ОКР свидетельствует о некотором совершенствовании микроструктуры модифицированного слоя, уменьшении дефектности. Вместе с тем известно, что изменение дефектности структуры металлических материалов приводит к изменению их физико-механических свойств [6]. Об этом также свидетельствуют данные об изменении микродеформации с увеличением энергии (рис. 3). Величина микродеформации указывает на степень искажения кристаллической решетки и, таким образом, по ее величине можно судить о степени дефектности структуры.

На рис. 4 представлены результаты измерения микротвердости поверхности после ЭИО медным электродом. Видно, что микротвердость возрастает с увеличением энергии нанесения покрытия. Исходя из того, что с повышением энергии ЭИО области когерентного рассеяния уменьшаются для обеих исследованных фаз (Al и Al_2Cu), и это свидетельствует об увеличении дефектности

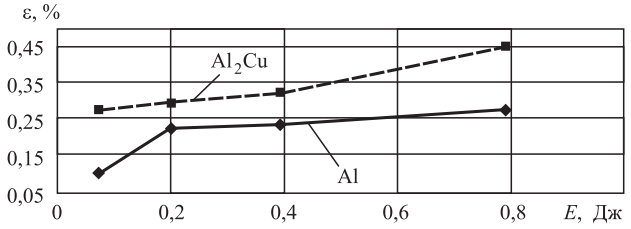


Рис. 3. Зависимость изменения микродеформации от энергии

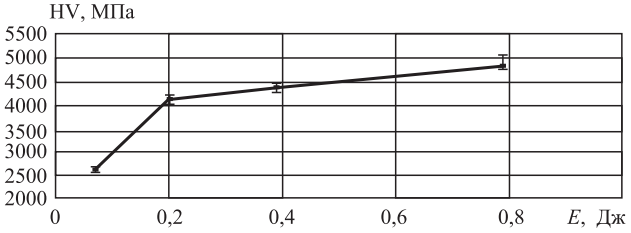


Рис. 4. Зависимость микротвердости от энергии

их структуры, можно предположить, что именно увеличение количества дефектов на поверхности и является причиной роста микротвердости. Повышение дефектности поверхности образца можно объяснить тем, что она сформировалась путем быстрой закалки материалов используемого электрода (Cu) и поверхности образца из сплава на основе алюминия. Взаимодействие этих жидких металлов и высокая скорость их охлаждения (закалка) и привели к образованию экспериментально обнаруженных фаз на поверхности. Быстрое охлаждение обрабатываемой поверхности может являться причиной образования высокой концентрации различных дефектов — дислокаций, точечных дефектов и др. Причиной повышения микротвердости может быть также мелкозернистая структура, полученная на поверхности, а также высокая степень полученных механических напряжений и микродеформаций вследствие быстрой закалки. Известно также, что мелкозернистая структура может привести к повышению прочностных свойств материала, в том числе и микротвердости [7].

Можно предположить также, что значительную роль в повышении микротвердости поверхности играет фаза (интерметаллид) Al_2Cu, концентрация которой увеличивается с повышением энергии ЭИО. Роль алюминиевой фазы, по-видимому, незначительна, так как ее прочностные свойства ниже, чем фазы Al_2Cu. Роль кремния также не может быть превалирующей, так как его концентрация не изменяется с ростом ЭИО (см. табл. 2).

Выводы

1. После ЭИО поверхности медным электродом при всех значениях энергии разряда наблюдается увеличение потери массы образца.

2. Микротвердость поверхностей, полученных после ЭИО, возрастает с увеличением энергии импульса при нанесении покрытия.

3. Повышение энергии импульса приводит к увеличению концентрации фазы Al_2Cu и уменьшению фазы на основе Al.

4. Увеличение микротвердости поверхности образца после ЭИО может быть связано с повышением дефектности ее структуры, о чем свидетельствует уменьшение размеров ОКР и увеличение микродеформаций с возрастанием энергии нанесения покрытия, а также обусловлено быстрым охлаждением поверхности (закалка) при нанесении покрытия и получением при этом мелкодисперсной структуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Юрченко Е.В., Юрченко В.И., Яковец И.В., Дикусар А.И.** Изменение состава и свойств электрод-инструмента в условиях электроискрового легирования сплавом Al—Sn // Электронная обработка материалов. 2016. 52 (2). С. 32—36.
2. **Бурумкулов Ф.Х., Сенин П.В., Величко С.А. и др.** Свойства нанокомпозитных покрытий, образованных на поверхности стали 20Х электроискровой обработкой стержневыми электродами из сталей 65Г и Св08 // Электронная обработка материалов. 2009. № 6. С. 22—29.
3. **Лазаренко Н.И.** Электроискровое легирование металлических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 42 с.
4. **Власенко В.Д., Верхотуров А.Д**. Численное исследование упругих и прочностных характеристик материалов покрытий, полученных электроискровым легированием // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 5. С. 671—678.
5. **Калиниченко В.А., Калиниченко В.А., Кукареко В.А., Шапелевич И.А.** Исследование структуры, дюрометрических и триботехнических свойств быстрозакристаллизованных сплавов системы Al—Cu // Наука и техника. 2015. № 1. С. 318—324.
6. **Шаренкова Н.В., Каминский В.В., Петров С.Н.** Размеры областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения в тонких пленках SmS и их визуализация // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. Вып. 9.
7. **Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И.** Материаловедение. СПб.: Химиздат, 2007. 781 с.

ИнМаш ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

МЕДЬ И МЕДНЫЕ СПЛАВЫ
ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ МАРКИ
СПРАВОЧНИК
Осинцев О.Е., Федоров В.Н.
2-е изд., перераб. и доп. 2016. 360 с.

Цена 1300 руб.

В справочнике впервые систематизированы и обобщены сведения о физических, механических и технологических свойствах почти всех марок меди и сплавов на ее основе: латуней, бронз, медно-никелевых сплавов, а также специальных медных сплавов: микролегированных, дисперсно-упрочненных, с эффектом памяти и др. Показано влияние легирующих элементов и примесей на свойства сплавов. Изложены сведения о составе и структуре, особенностях термической обработки, даны двойные и многокомпонентные диаграммы состояния, определяющие фазовый состав. Приведены также сведения о свойствах зарубежных аналогов отечественных медных сплавов. 2-е издание (1-е издание 2004 г.) переработано в соответствии с новыми стандартами, а также дополнено сведениями по припоям на основе меди.

Для инженерно-технических работников машиностроительных, металлургических и металлообрабатывающих предприятий, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, а также для студентов, аспирантов и преподавателей высших учебных заведений и университетов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:
по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru.
Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru

К сведению авторов журнала «Упрочняющие технологии и покрытия»

Объем статьи (текст статьи, рисунки, таблицы), предлагаемой к публикации, не должен превышать 12 страниц, напечатанных на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа через два интервала 12-м кеглем.

Все страницы в статье должны быть пронумерованы.

В редакцию предоставляется статья в электронном виде – файл (с расширением .doc или .pdf) с набором текста (шрифт Times New Roman) или распечатанная рукопись (на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа).

Электронная версия может быть выслана по e-mail: utp@mashin.ru

Требования к оформлению статьи

1. Обязательно должны быть представлены сведения об авторах:

- Ф.И.О.;
- ученая степень и звание (если есть);
- место работы;
- должность;
- адреса и телефоны (домашний и служебный), факс;
- E-mail.

Названия учреждений, в которых выполнялись исследования, необходимо раскрывать полностью, указывать город.

2. Обязательно представлять на русском и английском языках:

- фамилии, имена и отчества авторов, название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- название статьи;
- аннотацию к статье;
- ключевые слова.

3. Начало статьи должно быть оформлено по следующему образцу:

- УДК (Индекс статьи по Универсальной десятичной классификации http://teacode.com/online/udc/);
- авторы (с указанием ученой степени);
- полное название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- город;
- страна (для иностранных авторов).

Ссылку на гранты необходимо обозначать звездочкой (*) на первой странице.

4. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского (не готического) и греческого алфавитов), цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми.

Для набора формул и буквенных обозначений следует использовать программу MathType или редактор формул Equation в офисном редакторе Microsoft Office Word.

5. После текста должен быть приведен список литературы, используемой при написании статьи.

Составляется список по порядку ссылок в тексте и оформляется по ГОСТ 7.0.5–2008. Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений. Количество литературных источников не должно превышать пяти наименований. Допускаются ссылки на литературу не ранее 2000 г. выпуска (при необходимости ссылку на более "старый" источник литературы приводят непосредственно в тексте).

6. Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов (с расширением .doc, .tiff, .pdf, .jpeg 600 dpi), размер не должен превышать 186 мм.

Рисунок должен быть четким и иметь подрисуночную подпись. Подрисуночные подписи следует представлять отдельным списком. Объяснение рисунков и фотографий в тексте и подписи к ним должны соответствовать содержанию рисунков.

Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст!

Все статьи, поступающие в редакцию, проходят рецензирование.

В случае отклонения статьи редакционным советом журнала редакция оставляет за собой право сообщать автору о решении ред. совета без предоставления рецензии.

Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются

Плата за публикацию статей не взимается

Международный союз машиностроителей и ряд ведущих университетов и организаций различных стран 23—29 сентября 2019 г. в городе Севастополе проводят

XXVI международную научно-техническую конференцию:

"МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА"

Цель конференции — обмен научно-технической информацией, определение перспективных путей создания и развития новой техники и технологий, разработка совместных научных программ, развитие международного сотрудничества, установление деловых контактов и коммерческих связей в данной области.

Международный программный комитет сформирован из ведущих ученых и специалистов данного профиля различных университетов и организаций мира.

ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

1. Практика и перспективы создания и применения прогрессивных и нетрадиционных технологий. Интегрированные технологии. Сборка в машиностроении, приборостроении. Абразивные и виброабразивные технологии.
2. Механизация и автоматизация производственных процессов. Прогрессивное оборудование.
3. Комплексная автоматизация проектирования, подготовки и управления производством. Экономические проблемы техносферы.
4. Проблемы создания и применения прогрессивных инструментов и инструментальных материалов.
5. Управление качеством продукции и технических систем. Проблемы инженерии поверхностного слоя изделий.
6. Современные проблемы машиноведения и деталей машин.
7. Современные проблемы инженерии материалов, процессов и материаловедения в машиностроении. Упрочняющие технологии и покрытия изделий машиностроения. Наноматериалы и нанотехнологии.
8. Вопросы моделирования и расчетов технических систем.
9. Специальная техника и технологии техносферы. Экологические проблемы техносферы.
10. Современные проблемы инженерного образования. Евроинтеграция в образовании.

В рамках конференции можно проводить рекламу и презентации фирм. Рабочие языки конференции — русский, украинский, английский, немецкий и французский.

Адрес оргкомитета

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДонНТУ, кафедра "Технология машиностроения", Оргкомитет
☎ Тел.: + 38 062 301-08-40, + 38 062 301-08-05;
☎ Моб. тел.: + 38 071 3060879; + 7 978 1369454 (во время конф.)
✉ E-mail: tm@fimm.donntu.org или mntk21@mail.ru
💻 http://konf-sev.donntu.org, http://iumb.donntu.org, http://www.donntu.org

Михайлов Александр Николаевич — председатель
Голубов Николай Васильевич — ученый секретарь

ООО "Издательство **"Инновационное машиностроение"**, 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2.
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
E-mail: utp@mashin.ru
Web-site: www.mashin.ru
Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96.
Технический редактор *Конова Е.В.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 27.12.2018 г. Подписано в печать 28.02.2019 г. Формат 60×88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1
Сайт: **www.aov.ru**